

科学技術動向

2004

5

No.38

科学技術トピックス

▶ ライフサイエンス分野

- ①各生物種のゲノム解読プロジェクト情報を一元化したオンライン情報の提供が開始される
- ②アルツハイマー病の早期診断プローブの開発

▶ 情報通信分野

- ① 2003 年度のチューリング賞アラン・ケイ氏に授与、コンピュータ利用の拡大に貢献

▶ ナノテク・材料分野

- ①ホウ素を注入したダイヤモンドにおける超伝導性の発見

▶ エネルギー分野

- ①固体高分子型燃料電池電解質膜の新たな開発動向

▶ 製造技術分野

- ①酸化チタン光触媒の被覆ガラスの特許権が確定一応用へ弾み
- ②超臨界二酸化炭素処理による高浸透性木材への改質

▶ フロンティア分野

- ①宇宙・原子力分野で中国との協力強化を図る EU

特集 1 人クローン胚の作成と利用

—治療的クローン (therapeutic cloning) をめぐる現状—

特集 2 半導体微細加工装置技術の最新動向

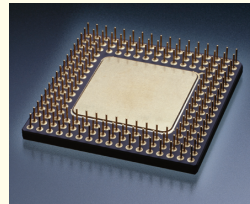
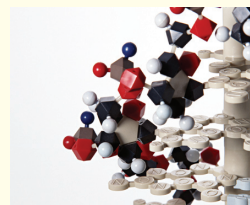
—開発研究における日本の産学連携への提言—

特集 3 “知的コンピューティング” に向けた研究動向

—認知科学と人工知能の複合領域研究の推進—

特集 4 米国の科学技術政策動向

—AAAS 科学技術政策年次フォーラム速報—



科学技術トピックス

ライフサイエンス分野

7

①各生物種のゲノム解読プロジェクト情報を一元化した オンライン情報の提供が開始される

ラットゲノムの完全解読（全体の90%以上）が報告されるなど、生物ゲノムの解読ラッシュが続いているが、このほど米英主導で設立された国際シーケンシング・コンソーシアムは、研究者間などでの大規模なシーケンシング情報の共有促進を目的に、世界中で取り組まれている各ゲノム解読プロジェクトの情報をオンラインで提供するサービスを開始した。動物、植物、それ以外の真核生物に関する171のゲノムのシーケンス解読プロジェクトの最新情報が掲載され、リンクにより各々のプロジェクトのホームページにアクセスし、詳細な情報を得ることもできる。これらのプロジェクトの内、8割が米国機関のプロジェクトであり、生物ゲノム解読においても米国が力を入れていることがわかる。

②アルツハイマー病の早期診断プローブの開発

現在、アルツハイマー病の診断は、特異的な痴呆という認知能力障害の進行に基づいて下されている。臨床症状の発現を待たず未然に診断する手段や、治療過程で治療効果を検証する手段が得られれば、治療方法の開発が躍進すると期待される。そこで、非侵襲性の断層撮影を行い、脳内の病変を検出する為の、プローブとなる分子の開発が進められている。最近、国立循環器病センターの研究者が設立したバイオベンチャー企業から、有望な候補物質に関する研究成果がthe Journal of Neuroscienceに発表された。

情報通信分野

8

① 2003年度のチューリング賞アラン・ケイ氏に授与、 コンピュータ利用の拡大に貢献

2003年度のチューリング賞をアラン・ケイ（Alan Key）氏が獲得した。同賞は、「計算機分野のノーベル賞」と称され、歴代の受賞者はコンピュータの世界における歴史的な貢献をしている。ケイ氏は1970年代初頭に「Smalltalk」と呼ばれるコンピュータ言語の開発を指揮した。この言語は、「オブジェクト指向」と呼ばれるプログラムの設計思想を反映している。この言語が、現在のコンピュータの利用環境やプログラミング言語、ソフトウェアの開発技法にあたえた影響は大きい。また同氏は、「Dynabook」と呼ばれる個人用情報端末の概念を提唱した。これはパーソナルコンピュータのあるべき姿をその草創期に予言したもので、コンピュータの世界に初めて利用者を中心とする考え方を導入した。

ナノテク・材料分野

9

①ホウ素を注入したダイヤモンドにおける超伝導性の発見

ロシア科学アカデミーと米国ロスアラモス国立研究所の研究グループは、高濃度のホウ素を含有するダイヤモンド結晶が超伝導体になることを報告した（E.A.Ekimov et al., Nature, 428, p.542 (2004)）。この研究では、10万気圧、2500℃程度の高温高圧下で約3%のホウ素を含有するダイヤモンド結晶を合成し、液体ヘリウム温度（-269℃）で電気抵抗がゼロになることと、3.5T（テスラ）の臨界磁場（超伝導性を保つことのできる磁場の大きさ）を確認した。報告者らは論文で、ダイヤモンドと同じ結晶構造をもつシリコンやゲルマニウムも特殊な条件下では超伝導性を示す可能性についても言及している。

エネルギー分野

9

①固体高分子型燃料電池電解質膜の新たな開発動向

電極と並び燃料電池の発電効率を決める中核部品である電解質膜において、最近、炭化水素膜の性能改善が進んでいる。炭化水素膜は、現在、主流のフッ素膜より大幅に製造コストが安い効率が寿命の点で劣る。今年 3 月、日立製作所は工業用プラスチックと同系統の高分子を基にした炭化水素膜で、4,000 時間の連続運転を実現したと発表した。実用化の目安、自動車向け 5,000 時間、家庭向け 2 万時間の寿命に一步近づいた。この膜は、石油化学のプロセスで生産可能で、将来、フッ素膜が今より安くなっても、さらに 1 ケタ安い価格を実現できるとみられる。炭化水素膜の性能向上が着実に進み始め、フッ素膜と炭化水素膜が電解質膜の主役を競う時代に入った。燃料電池のキー技術として日本がリードする分野であり、今後の展開が期待される。

製造技術分野

10

①酸化チタン光触媒の被覆ガラスの特許権が確定—応用へ弾み

光触媒はナノテクノロジーの研究成果が実用化に結びついた技術の 1 つで、現在、具体的な製造技術の開発に関心が集まっている。光触媒ほとんどの応用製品に酸化チタンが用いられており、これは光が当たると汚れを分解する性質を利用して汚れ防止や空気、水の浄化、殺菌等の効果を狙っている。このほど財神奈川科学技術アカデミー（KAST）らは、ガラスに光触媒をコーティングする技術の基本的な特許が確定したことを明らかにした。窓ガラスに利用されると清掃コストを大幅に削減し、自動車用では安全性を向上させるなど、今後大きな市場が期待される。

なお、酸化チタンの光触媒作用を発見した本多健一、藤嶋昭の両氏は、環境改善に大きな貢献を果たす技術を開発したとして、去る 4 月 22 日に日本国際賞が贈られている。

②超臨界二酸化炭素処理による高浸透性木材への改質

超臨界二酸化炭素はコーヒーの脱カフェインプロセスなどに欧米では広く用いられている技術である。(独) 森林総合研究所は、この超臨界二酸化炭素を用いて木材を処理すると、薬剤等の浸透性が著しく向上することを実証した。森林資源の有用成分の抽出などには既に応用されているが、今回のねらいは木材への防腐・防蟻剤の浸透を阻害するような成分を除去し、木材の浸透性を向上させることにより、薬剤処理効果の改善、環境負荷の小さい薬剤注入技術の開発をすることにある。今後、さらに実用化に向けた条件で検討が進められる予定である。

フロンティア分野

11

①宇宙・原子力分野で中国との協力強化を図る EU

欧州連合（EU）は急速にアジア諸国、とりわけ中国との連携強化に乗り出している。

4 月 7 日、EU のビュスカン研究開発担当委員は中国を訪問し、宇宙分野及び熱核融合での欧州・中国の科学技術協力の共同声明に署名した。宇宙開発において今後協力を進める分野として、欧州の測位衛星システム（ガリレオ計画）、全地球環境・安全監視（GMES）計画、太陽系・深宇宙探査、科学者の交流などがあげられた。また、国際熱核融合実験炉（ITER）については日本とフランスが誘致を競っているが、EU は中国に対し欧州誘致を積極的に働きかけ、中国も支持を表明している。

人の体細胞核を脱核した卵子に移植して発生を開始させた細胞（胚）、人クローン胚は、その用途の区別から、人クローン個体産生を目的とする「生殖的クローン（reproductive cloning）」と、人クローン胚を医学的治療に用いることを目的とした「治療的クローン（therapeutic cloning）」に区分されている。人クローン個体の産生（生殖的クローン）が世界的に禁止される趨勢の一方で、治療的クローンについては研究の実施を認めている国もある。また、人クローン胚由来のヒト ES 細胞の樹立に成功した研究報告もなされ、再生医療に向けた成果と現状の限界を示す知見とが蓄積しつつある。このような情勢の中で、わが国では治療的クローンに法的規制上の道を開くか否かの議論が続けられており、本記事では、現時点における人クローン胚をめぐる状況を、生物学的側面及び社会的側面から俯瞰した。

現在、実験動物におけるクローン胚由来の個体は、個体としての多様な異常の他に、組織・細胞レベルでも正常との差異を有しており、治療的クローン研究の最終目的のひとつでもある再生医療の実現において、安全上の問題となり得るのか否かが検討課題となっている。これらの異常は、初期発生におけるゲノム遺伝子機能に対する非遺伝的、エピジェネティックな「初期化」と呼ばれる修飾（epigenetic modification）が重要な役割を果たしていると考えられているが、そのメカニズムは科学的に未解明である。他方、実際にクローン胚由来の ES 細胞を分化させ、かつ遺伝子組み換えによる遺伝子治療を行ったマウスの実験が成功するなど、治療的クローンの実用上の可能性が示唆されている。また、倫理的課題であった卵子の入手方法に関し、手術における摘出材料の使用、ES 細胞から作成された卵子（あるいは卵子に類似した細胞）の初期化ツールとしての利用など、新たな手段の可能性が示唆されてもいる。わが国では、体性幹細胞を用いた再生医療の試みは、既に臨床研究として実施されており、ES 細胞由来の細胞についても、数年の間に急速な展開もあり得る状況である。

現在、治療的クローンを認めるか社会に賛否両論がある。社会に再生医療や研究に向けた強い要請と期待がある中では、実施を想定して、推進・反対、双方の受容と信頼が得られる手続きや制度を、社会的な議論に基づいて定める必要がある。適切な制度としては、市民・社会の参画、リスク管理、医療や研究などの質的管理、被験者の人権の保護などが、包括的に行われるための、手続き・制度として、専門的な中間機関を核とした仕組みを考えることができる。中間機関とは、科学技術と社会とを適切に仲介するという意味において中間的な位置付けの機関のことである。わが国においては今後、市民が参画することで信頼や安心をもたらすことが可能な、ガバナンスシステムの適用を考慮すべきであろう。

半導体微細加工装置技術の最新動向 —開発研究における日本の産学連携への提言—

今年に入りモバイル機器やデジタル情報家電の盛況に引かれて日本の電気メーカの半導体微細加工装置への設備投資意欲が顕在化している。この装置は半導体デバイスの最先端製品の技術ネックを掌握するため、日本が今後も半導体産業や技術のイニシャティブの一端を担い続ける戦略上極めて重要である。この製品を支える技術は、世界中でも特に日本の光学メーカと電機メーカが互いに産々連携しながらハイテクの粋を集め、研鑽に研鑽を重ねてきた光学技術や精密機械制御技術の極限をさらに追求している技術であり、ビジネス面でもこれまで日本の企業が世界市場のトップシェアを確保してきた。しかし、最近、トップの座を脅かされ、また技術面でも液浸という新たな技術ブレイクスルーのきっかけがアメリカの大学 MIT から始まった経緯もあり、今後の動向に楽観は許されない。

本報告では、今後も日本の企業がそのお家芸である微細加工装置開発での国際競争力を発揮し続け世界市場で首位の座を維持するにはどのような手だてが施策として補強されるべきかを、企業と日本の大学の応用研究部門との産学連携の進め方の観点から検討する。そして、従来よりももう一步踏み込んだところで、以下の2つの提言を行う。

その第一は、革新的な技術そのものを生み出す研究開発の進め方に関する提言である。すなわち、企業の開発現場はマーケットニーズと科学的知識のシーズの接点であり、そこに噴出する技術課題が発明や発見のチャンスを与えていることにまず気づくべきある。そして、応用研究に携わる日本の大学の研究者は、その現場へ従来以上に深く足を踏み入れて先端の技術課題を企業と共有して行くことが必要である。そこでは必ず知財の管理と保護の問題が立ち上がるが、現在、大学や公的研究機関で既に設置されている TLO が、従来のように、大学サイドの権利を守るという視点だけでなく、企業サイドの権利を守る手立てをも考慮した相互に対等な法的契約関係を構築して行くことである。さらに、企業サイドは、現場の技術課題を宝の持ち腐れとせず、企業の知財管理部と TLO の監視のもとで大学に積極的に開示し、大学の研究者の優秀な頭脳を活用することである。

そして、第二は、現状の TLO がかかえている発明の権利化の効率を高めるための特許技術に関する提言である。すなわち、産学連携に携わる大学の研究者は、ヒットすれば大きい但其確率は極めて低い基本特許を狙うだけでなく、実用化の推進過程で生み出される周辺特許も企業の研究者と協力して持続的かつ網羅的に出願し、特許網を構築して行かねばならない。また、特許の権利維持には費用がかかるため、既出願特許のスクリーニングの工程を企業の特許業務経験者と協力してさらに厳密にして行かねばならない。

以上のような特許技術を含む対等な法的契約関係をベースとする企業と大学のギブアンドテークのルールの合意の元に、双方の先端技術開発や製品開発の経験者が集まってテーマ毎にプロジェクト体制を敷き、実用化と特許取得目標の達成に向けた工程を果敢に実行して行くことが、開発研究において国際的に通用する本格的な産学連携の姿である。

日本ではブロードバンド加入者が1,500万人になり、ユビキタス社会が近いと言われる。しかし、現在のコンピュータは、一般のユーザーにとって使い勝手が悪く、ソフトウェアによる知的処理もまだぎこちない。コンピュータを自然に使える人と親和性の高いコンピュータが望まれており、それが実現できれば、人とコンピュータの共同作業がスムーズに進み、知的生産性を向上させることができる。

人間の知的活動を支援する能力と、人間との自然なインターフェースを持つ、“知的コンピューティング”を実現する研究は、人工知能分野で進められてきた。コンピュータ上に知能を創ろうとする人工知能の研究は、コンピュータの出現後まもなく開始され長い年月進められてきているが、その人工知能の知的能力はなかなか向上せず、研究に対する非難の声もあった。しかし、コンピュータの処理速度が向上するとともに、実現される知的処理の性能も向上し、その研究成果は人工知能としては見えにくい形であるが断片的に多くの情報システムに組み込まれて実用化されている。最近では、機械学習アルゴリズムを取り入れたデータマイニング研究が盛んになり、セキュリティ技術の発展に大きく貢献している。

しかし、コンピュータの処理性能にのみに依存する数理的機械的アプローチでは、知的処理能力の向上には限界が見える。この限界を乗り越えるアプローチとして、人間に学ぶ研究に期待が寄せられている。人間の認知メカニズムを解明する認知科学研究では、1990年代から脳の非侵襲観測技術の進歩により、認知機能と脳内活動とのマッピング研究が大きく進展し、認知活動における視覚・聴覚・運動などの相互作用が一部解明されてきた。思考・推論など中枢系の認知機能のメカニズムはまだ断片的にしか解明されていないが、行動系の認知特性は認知心理学実験を中心に研究が進められ、一部情報機器のヒューマンインターフェース設計に利用が始まっている。

従来、認知科学の研究は基礎研究として成果を出す但那その応用への展開には積極的ではなかった。情報通信技術者は、認知科学の知見を利用するのみで、相互の連携は少なかった。しかし、情報通信における課題を認知科学研究へ持ち込み認知科学の立場から解明する努力により、新しい展開が拓ける可能性が高い。

最近米国では、認知科学と人工知能の複合領域の研究を推進させるプロジェクトが盛んである。応用への出口を意識した基礎研究とそれをフォローする応用研究が積極的に進められ、そのための研究拠点計画も進められている。この分野では先頭を走っている。情報通信分野の研究速度は非常に速く、基礎から応用へのスピードは速い。

日本にも優れた基礎研究の芽はあるが、それがなかなか大きく育たず応用へも結びつきにくい状況にある。複合領域の研究もプロジェクトが終了すると研究チームは解散し、その後大きく発展して行きにくい。出てきた芽を大きく育てられるように、研究拠点を作るプログラムの検討や、大学では、研究組織のスクラップ・アンド・ビルドをも含む柔軟な運営が望まれる。また、基礎研究を応用研究に結びつける努力も少ない。基礎と応用の交流のインセンティブを増やし、応用への出口を意識した基礎研究を推進することと、また、産業界もよい芽を実用化させるため共同研究の提案など積極的に大学に働きかけることが必要である。

特集－4

米国の科学技術政策動向

—AAAS 科学技術政策年次フォーラム速報—

— 39

2004 年 4 月 22 日、23 日に AAAS (American Association for the Advancement of Science) の科学技術政策年次フォーラムがワシントン DC において開催された。今年は、ジョン・H・マーバーガー大統領科学補佐官をはじめとする政府高官、トム・ダシュル民主党上院院内総務などの議会関係者、大学の研究担当幹部、関連シンクタンクのアナリスト、学会団体ロビーイング担当スタッフ、さらには諸外国の科学技術政策の関係者など計 500 名以上が参加し、活発な議論が行われた。

イラク戦争の終結から 1 年が経った中で開催された今年の年次フォーラムであるが、非国防 R&D 予算確保の難しさ、ビザ問題、生物系研究所の管理問題など、2001 年のテロ以降、安全保障の問題が米国の科学に大きな影を落としている様子が垣間見えるものであった。特に、米国の財政問題およびテロ対策優先の風潮から、2006 年度以降非防衛 R&D 予算が減少していくとの見通しに、米国の学界が強い危機感を感じている。

経済競争の強力な相手国としては、中国が強く意識され注目を集めていた。国の総研究開発費や論文出版数の絶対量では米国、日本がまだ優位性を保っているが、他方で中国の存在感が急激に増しつつある。対照的に日本の存在感は小さくなりつつある。

また、次の研究開発の大きな課題として「心に関する研究」あるいは「認知科学」が浮上しつつあるように感じられた。認知科学については、現状では米国で国家規模のプロジェクトは実施されていないが、ナノテクノロジー、インフォメーションテクノロジー、バイオテクノロジーなどに関連した形で、今後国家規模のプロジェクトが実施される可能性もあり、今後の進展を見守る必要がある。

科学技術 トピックス

以下は科学技術専門家ネットワークにおける専門調査員の投稿（5月号は2004年4月1日より5月7日まで）を中心に「科学技術トピックス」としてまとめたものです。センターにおいて、関連する複数の投稿をまとめ、また必要な情報を付加する等独自に編集するため、原則として投稿者の氏名は掲載いたしません。ただし、投稿をそのまま掲載する場合は、投稿者のご了解を得て、記名により掲載しています。

ライフサイエンス分野

① 各生物種のゲノム解読プロジェクト情報を一元化したオンライン情報の提供が開始される

国際ラットゲノムコンソーシアムより、ラットゲノム情報、およびヒト、マウス、ラットの三者のゲノム比較などがNature誌上に発表（Vol.428, 493-521）されるなど、生物ゲノム解読ラッシュが続いている。

こうした状況を背景に、米国ヒトゲノム研究所は、英国ウェルカムトラストと共に推進している国際シーケンシング・コンソーシアム（ISC）が、大規模シーケンシング情報の研究者間などでの共有を促進するため、オンラインによるフリーアクセスのサービスの提供を開始したと2004年3月24日発表した（www.intlgenome.org）。

ここには、世界中で取り組まれている動物、植物とそれ以外の真核生物に関するゲノムのシーケンシングプロジェクトの最新情報が掲載されている。ウェブにアクセスすると誰でも、それぞれのプロジェクトで対象とされた生物種名、ゲノム解読を実施した研究グループ名（国名）、研究予算を支援した機関名などの情報を得ることができる。現在進行中のプロジェ

クトについては、ゲノム解読が終了すると見込まれる年月が記載されている。また、各プロジェクトのゲノム解読に用いた実験手法についての簡単な説明がある。さらにゲノム配列などの詳細かつ具体的な情報が知りたい場合は、リンクからそれぞれのプロジェクトのホームページにアクセスすることが可能である。

現在171のプロジェクトが掲載され、米国はその内の8割を占めている。この他、フランス、ドイツ、日本などの各ゲノム解読プロジェクトの情報も掲載されている。ヒト、マウス、チンパンジー、イヌなどのゲノム解読プロジェクトは一般にもよく知られているが、コウモリ、アルマジロ、オポッサム、ノブタ、ウマなどのゲノムプロジェクトも実施されていることがウェブ上からわかる。

ヒトゲノム解読プロジェクトの終了後においても、引き続き世界各国（特に米国）ではヒト以外の生物種に対するゲノム解読のプロジェクトが実施され、次々とゲノム解読の結果が報告されている。その多くが米国主導であり、生物ゲノム解読においても米国が力を入れていることがわかる。

（NIH News 2004年3月24日より）

② アルツハイマー病の早期診断プローブの開発

現在、アルツハイマー病の診断は、進行性の認知能力障害という臨床症状に依存している。病状の進行度を示す生理的指標は無く、決定的な治療方法は得られていない。

アルツハイマー病患者の死後に脳検体を調べると、ベータ・アミロイドという蛋白質の蓄積した老人斑が観察される。老人斑の形成した部位では神経細胞が脱落しており、これが患者に様々な認知能力の障害を引き起こす主因とされている。ベータ・アミロイド蛋白の沈着は、臨床症状の出現に先行して始まっており、沈着物の量は痴呆の進行度の良い指標になるとされている。しかし、これまで患者の生存中に、患部で沈着している同蛋白質を測定する方法は存在しなかった。

既存の色素分子の中で、老人斑を高感度で染色するものの一部が、試験管内でベータ・アミロイド蛋白の沈着を阻害する作用を示し、治療薬として期待された。しかし、人体に投与した薬物が、脳に到達するためには、血液脳関門という生体の防御機構を透過する必要がある、これらの色素はいずれも透過性を示さなかった。そこ

で、これらの色素分子を修飾した誘導体の開発と、その生理作用の研究が展開された。生体内で沈着したベータ・アミロイド蛋白に到達する誘導体が得られた場合、先ずはアミロイド沈着の早期診断に用い得る。生体内での検出手段を改良すれば、様々な治療の効果を正確に評価する事が出来、治療手段の開発を促進し得る。更に、このような誘導体を、アミロイド沈着の形成を阻害するように改変すれば、治療薬に直結すると期待される。

PET 等の画像診断のプロープとして利用できる分子の条件は、①ベータ・アミロイド蛋白に高い親和性で結合し、②容易かつ安定に放射性同位元素標識され、③血液脳関門を透過して脳に到達し、④検査後迅速に体内から排出される事である。最近、日本のバイオベンチャー企業であるビーエフ研究所の開発した候補物質 BF168 は、アルツハイマー病のモデルマウスを用いた実験で、末梢血管から投与すると脳に達し、アミロイド沈着物に結合していることが示

された。他の物質に比べ、ヒト脳検体上でもアミロイド沈着物に対する結合の特異性が高く、マウスの実験では体内からの排出が迅速であるという利点を持っている。臨床応用に向けて、画像診断を下すに足る正確さでアミロイド沈着の進行度を反映するか否か、等といった点に関して更に検討が進められている。

(参考文献: the Journal of Neuroscience, Vol.24, 2335 - 2541, 2004)

情報通信分野

① 2003 年度のチューリング賞アラン・ケイ氏に授与、コンピュータ利用の拡大に貢献

2003 年度のチューリング賞は、アラン・ケイ (Alan Key) 氏が獲得したと報じられた。同氏は、コロラド大学で数学と生物学を専攻したのち、ユタ大学で電気工学の修士を終え、博士課程においてオブジェクト指向の考え方を導入した視覚的なインターフェースを持つパーソナルコンピュータの着想に至っている。

4 月 21 日付けの発表によると、授賞では「Smalltalk」と呼ばれるプログラミング言語の開発を指揮した業績を評価している。開発は、1970 年代の初頭に米国 Xerox 社の Palo Alto 研究所において行われた。

この言語は、「オブジェクト指向」というプログラムの設計思想にもとづいて、GUI (Graphical User Interface) の機能を導入したものである。この言語が、現在

のコンピュータの利用環境や日幅広く利用されている C++ や Java などのプログラミング言語、さらにソフトウェアの開発技法に与えた影響は大きい。

また、Smalltalk には、現在のコンピュータアプリケーションでは当たり前となっている視覚的な知的作業の環境 (authoring environment) が備わっていた。

さらに、ケイ氏は、コンピュータ技術の草創期に、「Dynabook^(注1)」と呼ばれるパーソナルコンピュータのあるべき姿を提唱している。そのコンセプトは、本の大きさをもつコンピュータで人間の知的活動を幅広く支援するものとして描かれており、後のパーソナルコンピュータの発達に大きな影響を与えた。

これらの研究は、コンピュータを利用した演算処理の世界に「利用者を中心とする取り組み (“user-centered” approach to computing)」を初めて導入したものとして評価されている。彼の名言の一つに、「“The best way to predict the future is to invent it.”

(注 1) 「Dynabook」という名称は後に東芝に商標として譲渡され、同社のパソコンの製品名となっている。

(未来予測の最良の方法は、未来を創造することだ)」というのがある。

チューリング賞は、ACM (米国に本部を置く世界最大規模の計算機学会: Association for Computing Machinery) によって毎年計算機学発展に寄与した人物に与えられる。同賞は、計算機の原理を考案したチューリング (Alan M. Turing, 1912 - 1954) を讃えて設立され、1966 年以来続いている。同賞受賞者系譜には計算機学上の巨人が名を連ね、同賞は「計算機分野のノーベル賞」と称されている。本誌の 2004 年 4 月号特集記事「計算機科学の研究動向と日本の課題—国際級学術賞から—」には、同賞についてのより詳しい記述がある。

ナノテク・材料分野

① ホウ素を注入したダイヤモンドにおける超伝導性の発見

ダイヤモンドは炭素のみからなり、硬度が高い、熱伝導率が高い、高い電場に耐えられる絶縁体、などの特徴がある。また、ダイヤモンドは半導体としての特性も有しており、シリコンの場合と同じように価数の異なる元素を注入することによって半導体特性を制御し、電子デバイスを作製しようとする研究が盛んに行なわれている。特に、4 価のダイヤモンドに 3 価のホウ素を注入して半導体特

性を変化させようとする研究が数多く報告されている。

このほど、ロシア科学アカデミーと米国ロスアラモス国立研究所の研究グループは、高濃度のホウ素を含有するダイヤモンド結晶が超伝導体になることを報告した (E.A.Ekimov et al., Nature, 428, p.542 (2004))。この研究では、10 万気圧、2,500℃ 程度の高温高压下で約 3% のホウ素を含有するダイヤモンド結晶を合成し、液体ヘリウム温度 (−269℃) で電気抵抗がゼロになることと、3.5T (テスラ) の臨界磁場 (超伝導性を保つことのできる磁場の大きさ) を確認した。他の多くの研究で行われ

ているホウ素の量に比べてかなり大量の注入量であることや、極めて高温高压な条件の合成方法であることなどの特殊性はあるが、ダイヤモンドの新たな一面を見出した実験結果として注目されている。今後、他の合成方法による高濃度ホウ素注入ダイヤモンドで追試がなされるものと思われる。

また、報告者らは上記の論文で、ダイヤモンドと同じ結晶構造をもつシリコンやゲルマニウムも特殊な条件下では超伝導性を示す可能性についても言及しており、ダイヤモンド以外の研究にも影響を及ぼすと考えられる。

エネルギー分野

① 固体高分子型燃料電池 電解質膜の新たな開発動向

燃料電池の電解質膜は、水素から電気を取り出す化学反応を担い、電極と並び燃料電池の発電効率を決める中核部品である。最近、この電解質膜のうち炭化水素膜の性能改善が進んでいる。

現在、電解質膜の主流は効率に優れたフッ素膜 (米デュポン社の「ナフィオン」等) である。しかし、原料となるフッ素を原石から分離する工程や、膜に加工する工程が複雑で、一般に 1m² 当たり 5 万円以上と高価である。例えば 1 Kw モジュール、100cm² × 100 セルの燃料電池の場合、電解質膜のコストだけで 3 万円以上になる。燃料電池は、1 組の電池 (セル) を何枚も積み上げた構造になっており、電解質膜が安くなれば、

電池全体も大幅に安くできる。

炭化水素膜はフッ素膜より製造コストが大幅に安い、発電効率や寿命の点でフッ素膜に及ばない。低コストの炭化水素膜が実用化できれば、燃料電池の用途は家庭向け、自動車向け、さらには携帯機器向けと大幅に広がり、莫大な需要が期待できることから、この性能改善に向けた研究開発は、各方面で活発に取り組まれている。

今年 3 月、日立製作所は炭化水素系の電解質膜を用いて、これまでより 4～8 倍長い寿命となる 4,000 時間の連続運転を実現したと発表した。実用化の目安は、自動車向けで 5,000 時間、家庭用で 2 万時間とされており、この炭化水素膜は、実用化にかなり近づいたといえよう (ちなみに現在のフッ素膜の寿命は約 2 万時間)。また、耐熱性の指標である耐熱温度 (ガラス転移温度) も、炭化水素膜は 200℃ 以上と、120～150℃ の

(注 1) ベンゼン骨格主鎖を有した耐熱性、耐酸化性、耐薬品性の優れた高分子樹脂材料。

フッ素膜より高く、燃料電池作動温度を高く維持できるため反応を加速しやすい。さらに、電気を取り出す効率でも、膜の材料を改質することでフッ素膜と同等の水準を達成した。この炭化水素膜は、工業用の芳香族系エンジニアリングプラスチック (注 1) と同系統の高分子を基にしており、膜の中心部に芯がつくられ、膜を破れにくくする工夫が盛り込まれている。石油化学のプロセスで生産可能で、将来、フッ素膜が今より安くなった、それよりさらに 1 ケタ安い価格を実現できるとみられる。

フッ素膜大手のデュポンも、並行して炭化水素膜の開発に乗り出している。日本企業でも、昨年

6 月には東洋紡が炭化水素膜の開発を発表し、また、電解質膜の供給元は未公表ながら、2003 年 10 月にはホンダが炭化水素膜を使った自動車用燃料電池を発表

している。

炭化水素膜の性能向上が着実に進み始めたことで、フッ素膜と炭化水素膜が二大勢力として電解質膜の主役を競う時代に入った。炭

化水素膜は、次代の燃料電池のキー技術として日本がリードしている分野であり、今後一層の性能向上、コスト低減に向けた研究開発の取り組みが期待される。

製造技術分野

①酸化チタン光触媒の被覆ガラスの特許権が確定—応用へ弾み

光触媒はナノテクノロジーの研究成果が実用化に結びついた技術の一つである。現在は、具体的な製造技術の開発に関心が集まっている。また、光触媒を応用した製品のほとんど全てが酸化チタンを用いている。その理由は、酸化チタンのもつ物理的および化学的安定性、無害無毒、原材料が廉価、という利点に因る（「科学技術動向」2002 年 12 月号）。

こうした光触媒の応用に関する国内特許は約 1,300 件出願されているが、その多数を占めるのは、タイルやガラスの表面に酸化チタンの被膜を形成し、セルフクリーニング（汚れ防止）、空気浄化、水浄化、殺菌等の効果を狙うものである。特にガラス上への被膜形成は、窓ガラス、照明などに用いられると掃除を不要にする（あるいは回数を減らす）ためメンテナンスコストの大幅な削減をもたらし、また自動車用ガラスでは安全性向上につながるなど、近い将来大きな市場が期待される。技術的には、ガラスの透明性を維持しつつ、長期にわたって安定した効果を維持することが鍵となる。

（財）神奈川科学技術アカデミー（KAST）、日本曹達㈱らは、共同出願していた酸化チタン光触媒を被覆したガラスの国内特許権

が 2004 年 3 月 1 日付けで確定したことを明らかにした（特許第 3258023「酸化チタン光触媒構造体」）。この特許は、KAST の光機能変換材料プロジェクト（1995～1999）と日本曹達㈱の共同研究による成果である。

酸化チタンには光が当たると汚れを分解する性質があるが、板ガラスに含まれるナトリウムイオンがこの光分解を妨げる問題があった。本特許は、板ガラスと酸化チタン層の間にナトリウムイオンの作用を妨げる層を設ける技術等を規定しており、ガラスへの酸化チタン被膜形成の際に基本的に必要となる技術と見なされている。2001 年に設定登録されたが、その後 5 件の異議申し立てがあり、特許庁による審理が行なわれていた。欧米、中国、韓国など海外 9 カ国での特許については取得済みである。KAST は今回の特許権維持の確定を受けて、この技術を日本発のオリジナル技術と位置付け、特許権共有者を代表して、世界市場への製品供給を考える企業にライセンス供与していく予定である。

なお、酸化チタンの光触媒作用は、1967 年に本多健一、藤嶋昭の両氏により発見された光による水の分解現象に端を発しているが、この両氏の功績に対しては、環境改善に大きな貢献のあった化学技術として本年 4 月 22 日に日本国際賞が贈られている。

②超臨界二酸化炭素処理による高浸透性木材への改質

木材はその温かな感触、美しい木目、落ち着いた色調で見る人に安らぎを与える天然材料として、建材、家具などに使われている。しかし、腐食、シロアリ被害、水や湿気による寸法くずれ、割れるなどの弱点もある。その対策として、薬剤による防腐・防蟻処理や機能性付与のための化学加工処理が行われているが、そのためには薬剤が木材内部まで十分に拡散浸透する必要がある。しかし、木材中の薬剤浸透を阻害する物質が薬剤の浸透経路を塞ぎ、十分な拡散浸透を阻害する一因となっていることが考えられる。

（独）森林総合研究所・木材改質研究領域の松永正弘氏らは、高い浸透性と溶解性を持つ超臨界二酸化炭素を用いた処理により、浸透を阻害する成分を効率的に抽出除去し、薬剤の高い浸透性を有する木材に改質することを試み、著しい改善効果を実証した。

超臨界二酸化炭素（ある温度と圧力の範囲で得られる、気体のような激しい分子運動と液体のような高い密度を併せ持つ CO₂ 流体）は、欧米では大規模な商用プラント用として既に 20 年余りの歴史を持ち、コーヒーの脱カフェインプロセス、ビール用のホップエキスの抽出などに用いられている。

日本でも小規模ではあるが、医薬・香料関係などで十数か所のプラントがある。特に最近は石油系溶剤を用いなくて、高い効率で且つ閉じた系でプラントが稼働できる可能性があることから、環境保護に有利な点で注目されている。

木材分野での超臨界二酸化炭素応用では今までに「材部、葉部、樹皮部に含まれる有用成分の抽出」、「CCA^①処理木材からの重金属類の抽出除去」、「防腐・防蟻剤の木質系複合材料への注入処理」

などがある。

今回の研究目的は、拡散浸透性に優れた超臨界二酸化炭素による前処理を木材に対して行うことで、木材への防腐・防蟻剤の浸透を阻害するような成分を除去し、木材の浸透性を向上させることにより、薬剤処理効果の改善、環境負荷の小さい薬剤注入技術の開発をすることにある。今回、スギ心材を試験片とし、エントレーナ（共溶媒）としてエタノールを5重量%混ぜ、圧力約120気圧、温度

用語説明

① CCA

クロム、銅、砒素化合物からなる木材防腐剤で、近年では環境に配慮した代替薬剤への転換が進んでいる。

40℃で、7時間抽出処理を行ったところ、未処理の場合に比べて約6倍の浸透性が実現した。今後、さらに実用化に向けた条件で検討が進められる予定である。

フロンティア分野

① 宇宙・原子力分野で中国との協力強化を図る EU

4月7日、欧州連合（EU）のビュスカン研究開発担当委員は中国を訪問し、宇宙分野及び熱核融合での欧州－中国の科学技術協力の共同声明に署名した。

EUは中南米諸国やアフリカ諸国とも種々の協力関係構築に努めているが、アジア地域とりわけ中国との連携を急速に強化している。経済発展が著しい中国と協力することは、欧州経済の活性化や食品安全・天然資源管理・環境保全などの諸問題の解決にも役立つと見ている。

ビュスカン委員らは北京で「中国－EU宇宙協力ハイレベルフォーラム」に出席し、中国側の科学技術部（省に相当）、国家航天局、宇宙関係研究機関などの多数の職員や専門家らと将来の宇宙協力政策について討議した。

宇宙開発において今後協力を進める分野として、欧州の測位衛星システム（ガリレオ）、全地球環境・安全監視（GMES）計画、太陽系・深宇宙探査、科学者の交流などがあげられた。中国は2000年10月から既に独自のナビゲーションシステム用の衛星である静止衛星「北斗」を3機打ち上げている。この衛星は、わが国でカーナビなどに用いられている米国空軍のナビスター衛星とは異なり、道路・鉄道・海上などの現場と管制センターの間でローカルなナビゲーション情報の中継を行うための衛星

である。中国はこれと並行して欧州が計画している30機の周回衛星で構成されるガリレオ計画に参加しており、既に2003年9月に北京大学内に訓練・協力センターを開設している。このセンターはガリレオの認知度を高め、中欧間の産業連携を促進することを目的としている。

一方、熱核融合に関しては、米国、ロシア、EU、日本、中国、韓国が共同で建設を計画している国際熱核融合実験炉（ITER）の設置場所を巡り、日本の六ヶ所村とフランスのカダラッシュが候補地として誘致を競っているところである。EUは、ITERの欧州域内への設置を求めて中国に積極的に働きかけており、中国もフランス設置案への支持を表明している。

.....

特集①

人クローン胚の作成と利用

—治療的クローン (therapeutic cloning) をめぐる現状—



第2調査研究グループ 牧山 康志

1. はじめに

人の体細胞核を脱核した卵子に移植して発生を開始させた細胞（胚）が人クローン胚である。人クローン胚は、その用途の区別から、人クローン個体産生を目的とする「生殖的クローン (reproductive cloning)」と、人クローン胚を医学的治療及び研究に用いることを目的とした「治療的クローン (therapeutic cloning)」に区分して考えられている。

人クローン個体の産生（生殖的クローン）については、現在、世界的に実施を禁止する趨勢となっており、国連において、人クローン禁止に関する国際条約化が検討されている。その議論の中で、やはり、①人クローンの全面禁止の立場と、②人クローン個体産生のみを禁止し、人クローン胚の作成・利用は各国に任せるとする立場（治療的クローンの許容）とで

折り合いがつかず、2001年に始まった議論は、さらに本年（2004年）12月を目処に議論が継続されることになっている。

こうした情勢に対し、2003年10月には、わが国の日本学術会議や全米科学アカデミーなど世界80以上のアカデミーが所属する国際的な科学アカデミーフォーラムである、インターアカデミーパネル (IAP) が、人クローン個体産生（生殖的クローン）の禁止を国連に促す声明を発表すると同時に、その声明の中で、研究や治療に用いるES細胞の樹立を目的とする「治療的クローン」については、医療や科学の進展への寄与が有望であることから、禁止を除外すべきである、とした。

このようにクローン技術のヒトへの応用が広く議論の対象となる状況の中で、2004年3月、米国サイ

エンス誌に韓国及び米国の研究者によって人クローン胚由来のES細胞樹立の成功が報じられた¹⁾。この報告は、従来から実験動物で示されていたクローン胚由来のES細胞の樹立がヒトでも可能であることを実証した。同時に、242個の卵子からスタートしてただ1つのES細胞株が得られるに止まったことから、同様な方法において実用に至るまでには、科学的知識や技術、また倫理的観点から克服すべき障壁の存在が推測される。

わが国では現在、総合科学技術会議生命倫理専門調査会において、人クローン胚の作成・利用（治療的クローン）に道を開くか否かの議論が続けられている。本稿においては、現時点における人クローン胚をめぐる状況を、生物学的側面及び社会的側面から俯瞰する。

2. 人クローン胚の法規制の状況

人クローンに関するいかなる研究も、わが国では法規制の範囲内で行われることが義務付けられ、現在は法的効力の及ぶ行政指針により、人クローン胚を作成・使用する研究が禁止されている。人クローンに関しては、産生の是非に関わる法律を有する国も有さない国もあり、また法的に禁止される場合でも、人クローン個体の産生のみを禁止する場合と、禁止が人

クローン胚の作成に及ぶ場合とがある。わが国では2000年12月に「ヒトに関するクローン技術等の規制に関する法律」（平成12年法律第146号、以下「クローン法」）が制定され、本法によって、法的に人クローン胚の胎内への移植の禁止（人クローン個体産生の禁止）が明確にされ、違反に対する刑事罰（10年以下の懲役若しくは千万円以下の罰金）も定められた。

加えて、本法律に基づいて文部科学大臣が定める「特定胚の取扱いに関する指針」（以下「特定胚指針」）に従って、人クローン胚やキメラ・ハイブリッド胚（ヒト・動物の混合、雑種）など特定胚の取扱いが行われることが指示されており、実質的に本指針違反についても、刑罰の対象となる構造である。すなわち、文部科学大臣によって研究等が指針に不適合と判

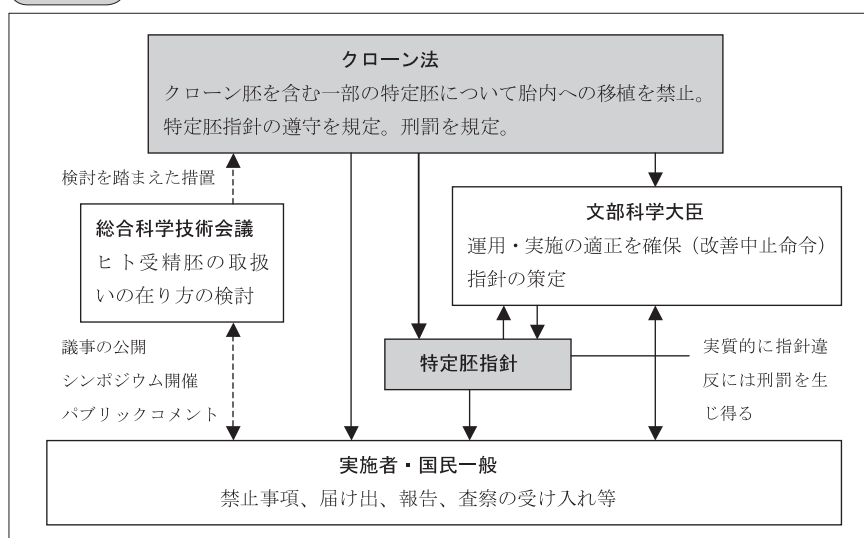
断され、同大臣による変更・中止命令等に従わない場合に、罰則（1年以下の懲役若しくは百万円以下の罰金）が科せられる構造になっている。

この特定胚指針においては、下記に簡略化して示した特定胚の中で、動物性集合胚の作成を除いて、他のすべての作成・使用を禁止した。つまり、人クローン胚も、胎内（子宮）への移植のみならず、作成自体が指針で禁じられている。

図表1 わが国の法律及び指針における特定胚の分類

特定胚（クローン法による定義を簡略化して記載）：	
①人クローン胚：ヒト除核未受精卵＋ヒト体細胞核	
②ヒト性集合胚：ヒト胚＋動物胚	
③ヒト動物交雑胚：ヒト・動物配偶子間での受精（及びその細胞の核を用いたクローン）	
④ヒト性融合胚：動物除核未受精卵＋ヒト細胞核（胚含む）	
⑤ヒト胚分割胚：ヒト初期胚（発生途上胚）を分割した胚	
⑥ヒト集合胚：ヒト胚＋ヒト細胞（胚含む）	
⑦ヒト胚核移植胚：ヒト除核未受精卵＋ヒト初期胚核	
⑧動物性融合胚：ヒト除核未受精卵＋動物細胞核	
⑨動物性集合胚：動物胚＋ヒト細胞	
使用される用語の概要	
ヒト性：ヒトの核を含む	
動物性：動物の核を含む	
集合胚：複数の胚を混合した胚、キメラ胚	
交雑胚：配偶子交配により得るハイブリッド胚、及びその核を用いたクローン胚	
融合胚：除核した卵子あるいは受精卵に対し核移植を行って作成した胚	

図表2 人クローン胚に関する規制の構造



3. 治療的クローンの意義

端的に表現すれば、治療的クローンの主要な意義は、再生医療における拒絶反応の回避を目的として自分専用の治療用細胞を作ること、ということができる。この意

義について、具体的な状況を概観する。

再生医療は、機能障害や機能不全に陥った生体組織・臓器に対して、細胞を積極的に利用して、そ

の機能の再生をはかるものである。つまり、障害を生じた臓器・組織に対し、様々な手法を駆使して目的の機能に合致するように人工的に調整した細胞、組織等を移植することで、失われた元来の機能を再生し、健康を回復するための医療である。

その実現のためには、臓器・組織移植で見られるような、移植された側（レシピエント）の免疫応答による拒絶反応を適切に抑制しなければならない。通常は、その目的のために、免疫抑制剤が使用されている。現在の移植医療は、心臓、肺、肝臓、腎臓等を問わず、免疫抑制療法の改善（シクロスポリンの登場）によって確立された

図表3 免疫抑制剤

免疫抑制剤	副作用
各剤共通	感染症に対する抵抗力の低下。
シクロスポリン	腎障害、肝障害、脳症の徴候、神経パーチェット病症状、急性膵炎、血栓性微小血管障害、溶血性貧血、横紋筋融解症、リンパ腫・リンパ増殖性腫瘍・悪性腫瘍、多毛、手指の震え、など。
タクロリムス	腎障害、糖尿病、手指の震え、心臓障害など。
ステロイド剤	消化性潰瘍、糖尿病、高血圧、緑内障、白内障、肥満、満月様顔貌など。
ミコフェノール酸モフェチル	白血球減少、貧血、下痢、食欲不振、など。
アザチオプリン	白血球減少、食欲不振、吐き気、肝機能障害など。
ミゾリピン	白血球減少、肝機能障害、食欲不振、吐き気、口内炎、膵炎など。

ともいわれている。

拒絶反応の予防と抑制のために使用される免疫抑制剤には図表3（現在腎移植において汎用されている薬剤について記載。この他に抗リンパ球抗体、IL2 レセプター阻害薬などがある）の副作用が指摘されている。通常、移植を受けた患者は複数の免疫抑制剤を組み合わせて、生涯継続的に（移植臓器が身体内にある間中）服用する必要がある。

1983 年の調査例では、シクロスポリン単独使用例（117 例）と非使用例（ステロイド・アザチオプ

リン、115 例）の比較で、死体腎移植の1年生着率は、シクロスポリン単独で72%、ステロイド・アザチオプリンで52%であった⁵⁾。現在では、死体腎移植の1年生着率は、併用療法で88.7%（1983 年以降の268 例による検討⁶⁾）に改善している。

このように、免疫的な拒絶反応の排除は移植医療上の本質的な課題であり、再生医療における細胞移植においても同様である。拒絶反応が、個人個人が異なる免疫関連遺伝子を有している（それにより各々が異なる組織抗原をもつ

ことに依拠しているため、患者本人のクローン胚（患者のゲノム遺伝子をそのままもつ）由来のES細胞を樹立し、それをもとに、適切に分化させた治療用の細胞を作成して移植に用いることが、拒絶反応の直接的な解決法として理論的に医療上の有効な手段となり得るのである。

実際、マウスを用いた治療実験においてクローン胚由来のES細胞の使用が、拒絶反応の回避、再生医療に有益であることが認められている⁷⁾。

4. クローン技術の現状

ここでは、再生医療における人クローン胚の応用という視点から、クローン胚からES細胞を樹立する過程の技術的な側面を俯瞰する。

人クローン胚の作成は、卵子に、クローン化したい個体から取り出した体細胞の核（体細胞が由来する個人と原則同様なゲノム遺伝子を含む）を移植し、適切な処理を加えることで、配偶子（精子、卵子）や受精のプロセスを経ずに胚の発生を行わせる技術である。そこで発生した初期胚（胚盤胞の段階）から、特定の細胞群（内部細胞塊）を取り出してES細胞を樹立することができる。これが人クローン胚由来のES細胞である。この一連の過程に関する生物科学的な研究成果等の現状について以下にまとめた。

現在までにクローン技術で個体を産した動物種は、ヒツジ、マウス、ウシ、ヤギ、ブタ、ウサギ、ネコ、ラバ、ウマ、ラットの各種である。これらの種間で個体発生に至る効率、異常の様態などがそれぞれ異なり、特に実験動物として汎用されるマウスは、他の哺乳動物との生理的な違いが大きいといわれている。

表現型の異常の原因には、①人

工的操作がもたらす卵子のダメージなどの技術的要因、②核移植に用いる体細胞のゲノムに生じた異常、分化・老化過程で生じた遺伝的変異などの遺伝的要因、及び③初期化（re-programming 発生に適した状態にする）や卵子活性化などに関わる非遺伝的な要因（後述するエピジェネティックな要因）が考えられている。

4 - 1

クローン技術で作成された個体に出現する異常

クローン技術については家畜や実験動物において、クローン胚から個体を発生させる実験の解析によって科学的技術的検討がおこなわれてきた。したがって、治療的クローンにおける人クローン胚の性質を知るためには、実験動物におけるクローン個体産生実験から得られた知見を俯瞰する必要がある。

(1)実験動物においてクローン技術で作成された胚を子宮内に移植すると、マウスの初期胚のほとんどは着床後すぐの胎盤形成期に死亡し、ウシ・ヒツジでは妊娠後期に発生が停止し、死産、

異常産仔が多い。また、種によらず新生仔に共通して仔・胎盤ともに異常に大きい。さらに、出生後に認められる異常は多様であり、呼吸機能、腎臓、肝臓、心臓、脳の異常などがある。成長の後では肥満、腫瘍の発生、短命がみられる。

(2)形質の異常の一部は、どのドナー細胞の核（繊維芽細胞か、ES細胞かなど）が使用されたかによって異なっている。ES細胞由来の核を用いると、通常

の体細胞に比べ10～20倍、クローン胚作成の効率が上がる。
(3)クローン個体の異常には、初期化の異常、卵子の活性化の異常、ドナー細胞保有の異常、体外培養により生じる異常などが考えられている。例えば、顕微授精における結果から、非遺伝学的異常がなくとも、技術的な影響により成功率が低下することが認められている。しかし全体的傾向としては、生物学的には、技術的なダメージや遺伝的（genetic）要因よりも、ゲノムインプリンティングなどのエピジェネティック^{（注1）}な要因が主であると考えられている。

(4)エピジェネティックな機構に

より、発生の開始可能状態を獲得する初期化には、生殖臓器において配偶子（精子、卵子）が形成される過程で行われる行程と、受精卵・胚の発生が開始された後の過程で行われる行程との2つの局面があると考えられている。クローン胚の核は、配偶子を形成する過程を経過していないため、完全で適切な初期化状態にはなり得ないと考えられている（図表4）。

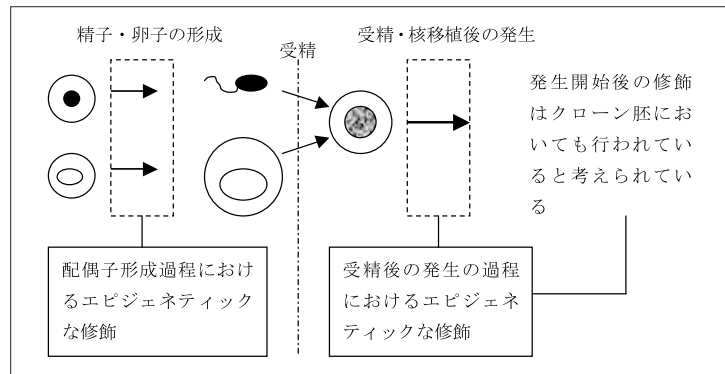
なお、通常の性行為を介した場合においても、受精後の正常なエピジェネティックな初期化過程を欠いた場合には異常が発生する。すなわち卵子の単為発生では奇形腫が形成されること、また、精子由来核のみを有する発生となった場合では、胞状奇体を生じることが知られている。

さらに、配偶子形成過程でのエピジェネティックな要因としては、インプリンティングと呼ばれる修飾（父方由来の遺伝子と母方由来の遺伝子とで発現状態が異なる現象を惹き起す、遺伝子発現調節の仕組み）とインプリンティングされていない遺伝子の修飾があり、他方、発生開始後としては、X染色体不活性化、テロメア長の調整がある。クローン胚では発生開始後過程である、X染色体不活性化、テロメア長のいずれも正常と同様であることが知られている。

(5)クローン個体の各臓器を構成する細胞の性質は、発現される遺伝子の種類などにおいて通常の

（注1）epigenetic、遺伝子変化を伴わない発現調節機構などに関わる修飾であり、DNAのメチル化、ヒストン蛋白の修飾、染色体高次構造などが関係している⁸⁾。次世代に遺伝されない。

図表4 エピジェネティックな修飾を生じる過程



生殖で生まれた個体とはかなり異なっている（DNAのメチル化の多様な変化、様々な物質の発現レベルなど）。

4-2

卵子の入手

クローン胚作成において卵子を使用することの生物学的な意義は、移植する核の初期化にあるといわれる。すなわち、ひとたび体細胞として、分化して機能するに至った細胞が、再び新たに初期胚を形成（発生を開始）するために必要な変化を遂げる過程である。

(1)卵子の入手には、①女性からボランティアで提供を受ける、②不妊治療その他の医療の過程で得られた中から提供を受ける、などが考えられる。

その際、「女性が材料提供の手段として取扱われる可能性」が人権やジェンダーの問題とされる。同様に、国連における議論の中で、アフリカ諸国から「大量の卵子の供給場所として、貧しいアフリカの国々の女性たちが使われる」という懸念が表出されている。また、卵子の採取に際しては、排卵誘発剤の使用、麻酔、手術など身体的な危険を伴う。例えば、排卵誘発剤の使用では、重篤な症状をきたす可能性（卵巣過剰刺激症候群）も指摘されている。

他方、不妊治療以外の医療から

の入手方法として、手術で摘出された卵巣から採取される卵子を使用する場合がある。

(2)現在、卵子の凍結保存法は確立されていないといわれる。しかしながら、凍結卵子を用いた体外受精の成功例はわが国でも複数例が報告されており、将来的には個々の卵子を凍結保存することや、卵巣組織の一部として卵子を凍結保存することが可能になることが考えられている。

(3)生体から採取・提供された卵子自体を使用することなく、ヒトES細胞を分化させた卵子、あるいは異種の卵子を用いるなどで、ドナーの体細胞核を初期化する方法の開発が進められている。その契機となったのがHübner (2003) らによる、マウスのES細胞から卵細胞が分化出現したという報告である⁹⁾。この報告により、生体の卵細胞と同様ではないにしても、体細胞核を初期化させてクローン胚として発生を開始させるツール（道具）としての卵細胞様細胞を大量かつ、簡便に（ES細胞を材料に試験管内処理だけで）獲得できる可能性が示唆された。本報告は、細胞移植医療に用いる細胞を産業的に医療現場に供給する可能性を示唆する知見であると考えられている。

(4)将来的には体細胞を直接初期化する技術など、初期化プロセスに関わる新たな技術の開発によ

って、患者本人の免疫的性質を受け継いだ拒絶反応を生じない移植用細胞を獲得するのに、必ずしも生体由来の卵子は必要とされない可能性も考えられる。しかしながら、初期化の生物学的な機構は、実験動物レベルでも基礎科学的には未解明の点も多く、今後の研究が俟たれている。

4 - 3

低い成功率

一般に、十分な技術があれば受精胚由来の胚盤胞からの ES 細胞樹立は、ほぼ 100%に近い効率で成功するといわれている。そ

れに比し、人クローン胚からの ES 細胞の樹立は、成功率が低い。Hwang らの報告では 16 人から採取された 242 個の卵子を用いて、まず核移植後に 30 個の胚盤胞を得るのに成功している (12%)。しかし、その後得られた ES 細胞は 1 株のみであるので、ES 細胞樹立過程の成功率は受精胚由来に比して大きく劣る。最終的な 0.4% という成功率は、生体由来の卵子の使用を前提とするなら、実用的とはいえない効率である。

しかし、Hwang らの報告の意義は、ヒトクローン胚由来の ES 細胞樹立が実現可能であることを実証したことにより、技術的な問題は今後解決されるべき課題とい

える。クローン個体の異常の項で述べたように、クローン胚は、配偶子形成過程における核の初期化過程を欠如しており、それを埋め合わせる技術の開発のためには、実験動物における基礎研究が必要である。当該基礎研究の現状では、未だ具体的な研究展開・成果の先行きは見えない段階といわれており、知識・技術におけるブレイクスルーが期待されている。いずれにしても、先に述べたように、ES 細胞由来の卵子（あるいはその類似細胞）を用いた研究も含め、適切な枠組みの中で、人クローン胚作成を含む研究が実施される体制整備の必要が、現実味を帯びてきたとの見方ができる。

5. ES 細胞を用いた再生医療研究の現状

現在、ES 細胞をもとにして分化させた細胞の実験動物における移植実験では、造血細胞、ドーパミン産生神経細胞、運動神経細胞、インスリン産生細胞などが報告されており、それぞれ、例えば、造血疾患、パーキンソン病、脊髄損傷、糖尿病などへの臨床応用が考えられている。また、報告例の中に、実際にクローン胚由来の ES 細胞を分化させ、かつ遺伝子組み換えによる遺伝子治療を同時に試みた免疫不全マウスの治療実験での成功例もある。同報告は、クローン胚の再生医療における有用性と同時に、遺伝子組換えが技術的に可能であるという ES 細胞の特性を利用した研究成果といえる。

わが国では、京都大学再生医学研究所において、ヒト ES 細胞の樹立が行われており、図表 5 の通り、3 株が樹立されて、一部については配布が始まっている (KhES-1, 2, 3、ヒト ES 細胞プロジェクト情報公開ページ)。なお、ES 細胞としての性質の同定については現在研究段階にあるが、安定した自己複製 (細胞・コロニー形態

など) と、多分化能の他に、正常な染色体 (核型)、未分化マーカー など (ALP、SSEA-4、TRA-1-60/81、Oct-3/4、Rex-1 等) の発現が調べられている。ES 細胞の性質には、未だ不明な点も多く、自己増殖の分子メカニズム等について、研究の進展が注目されている。

実験動物におけるクローン胚由来の個体は、個体としての様々な異常の他に、組織レベルでも正常との違いがある。それゆえ、クローン胚の再生医療への応用、すなわち、人工的に作成された (自然には存在し得ない) クローン胚を移植用細胞として使用することに安全上の問題があると指摘されている。初期化に依存すると考えられるこれらの異常に関わるメカニズムは前述の通り、実験動物においても未だ明らかにされていない。他方、実験動物における再生医療実験の成功は、仮に細胞の性質に正常細胞との違いがあり、そのことが個体発生過程においては問題となるとしても、成人の生体内で治療に用いる細胞として必要

図表 5 各国のヒト ES 細胞の細胞株の樹立例

米 国	27
スウェーデン	25
インド	10
韓 国	6
オーストラリア	6
イスラエル	4
合 計	78

2001 年 8 月時点で、米国 NIH により認証されたヒト ES 細胞株の数を示す NIH Stem Cell Registry をもとに作成。

日 本	3
-----	---

わが国では、2003 年 5 月及び 10 月に樹立された (京都大学再生医学研究所)。

な機能を維持する場合には安全性や有益性についての実用上の問題を生じない可能性も推測される。さらに、倫理的課題のひとつであった卵子の入手方法に関しても、手術における摘出材料の使用、ES 細胞から作成された卵子 (あるいはその類似細胞) の初期化ツールとしての利用など、新たな手段の可能性が示されている。

以上を踏まえて ES 細胞の樹立の様式を図表 5 に示した。再生医

療に応用が可能な ES 細胞の樹立へ向けた様々な試みがある。すなわち、受精胚、クローン胚由来の ES 細胞に限らず、ES 細胞由来の卵子様細胞を用いたり、細胞融合の技術を応用したりという試みである。さらに、最近英国科学誌ネイチャー誌に発表された日本及び

韓国の研究者による報告¹⁰⁾では、マウスのエピジェネティックな現象（ゲノムインプリンティング）に関連していると考えられていた遺伝子（H19）に着目して、その遺伝子に変異をもつ卵子をマウスで作成し、その細胞を受精の過程を経ずに発生させることで、結果

として生殖も可能な個体を得ることに成功している。初期化におけるエピジェネティックな現象の関わりを実証した本例のように、科学的に未解明の点が多い初期化のメカニズム自体も確実に解明に向けた研究が進められつつあるといえる。

6. 体性幹細胞と ES 細胞

人クローン胚由来の ES 細胞に対し、生物学的な性質は異なるが、成人の身体組織から得られる体性幹細胞の存在が知られており、再生医療に有用といわれている。体性幹細胞の使用は、ヒト胚や人クローン胚の使用と異なり倫理的な問題は少ない。現時点で、体性幹細胞と、クローン胚由来の細胞及び ES 細胞との性質の比較を以下にまとめた。

①人工的なクローン胚由来の細胞、未成熟な性質をもつ ES 細胞、それらに由来する細胞と比較し、元来身体の一部組織として存在していたという点におい

て、体性幹細胞は、生体内へ戻す移植医療において、より安全性が高いと推測されている。

②体性幹細胞であっても、マウスの骨髄細胞を心筋細胞へ分化させることなどが試みられており、多様な分化能力や実用性への期待がある。なお、現在既に白血病等に対する臍帯血細胞を用いた移植治療は、骨髄移植に匹敵する適応数となっている（臍帯血移植は回復までの期間が長く、成人レシピエントにはリスク（出血、感染）が高いとされるが、その改善のため、術前骨髄抑制の軽減や、体外培養などが検討されている）。

分化能が限定的であるといわれる体性幹細胞の例外として、Jiang (2002) らによって報告された多分化機能をもつ体性幹細胞の分離の報告がある¹¹⁾。この幹細胞は、マウス、ラット、ヒトからそれぞれ分離されているが、未だその有用性に関する研究はなされていない。体性幹細胞の多分化能については、疑問視する報告もあり、将来的な実用性は未知であるといわれている。

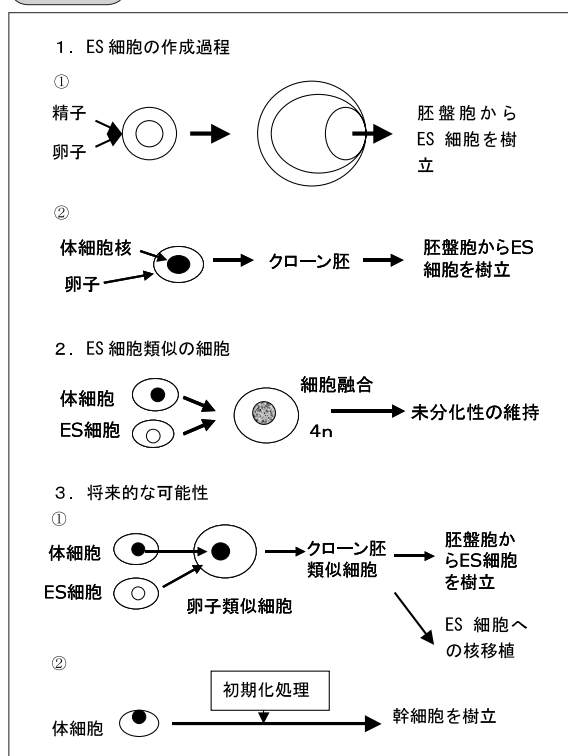
③ ES 細胞に比較し、体性幹細胞は採取の困難、増殖の困難がある（ES 細胞は長期間、無制限に、増殖維持できる）。

④ ES 細胞の特性として、遺伝子改変ができる、一定の品質の多数の材料を得られる、細胞株の垂株を樹立できる、細胞供給を安定・標準化できる、といわれる。一方、体性幹細胞において、それらの可能性は不明あるいは困難である。

なお、体性幹細胞や、ES 細胞の臨床応用に向けた研究のために、新たに開発された免疫不全マウス（NOG マウス：NOD/SCID/ γ^c null 伊藤守ら、(財)実験動物中央研究所）が、移植用細胞の再生分化、安全性等の生体内（in vivo）の検証手段として期待されている。

このように、体性幹細胞、ES 細胞はそれぞれの特性がある。体性幹細胞は治療が必要な個人から採取され得るならば、ヒト受精胚の使用、クローン胚作成の必要も

図表 6 ES 細胞等の作成の方法



生じない。しかし、分化、増殖能力、あるいは生体からの採取に限界が考えられており、現状においては、体性幹細胞、ES 細胞、双方の研究を進める必要がある。

また、厚生科学審議会のアンケート調査、「わが国における体性幹細胞を用いた臨床応用の実態調

査」2002 年によると、該当例として、研究段階 90 施設、前臨床研究段階 3 施設、臨床研究段階 16 施設（参考文献³⁾）の資料によるとなどが挙げられており、少なくともこれらにおいて、臨床試験では既に、血管の閉塞性疾患、表皮、骨などについて、患者被験者への

移植が施行されている。他にもわが国の脊髄損傷患者で、既に中国における嗅神経組織中のグリア細胞（olfactory ensheathing cell）を用いた脊髄の再生医療を受けた例もあるといわれ、わが国がどのように取り組んでいくべきかが、喫緊の社会的課題であるといえる。

7. 治療的クローンに関わる議論

7 - 1

わが国の議論

「ヒトに関するクローン技術等の規制に関する法律」（2000 年）では、その附則第 2 条に「政府は、この法律の施行後 3 年以内に、ヒト受精胚の人の生命の萌芽としての取扱いの在り方に関する総合科学技術会議等における検討の結果を踏まえ」クローン法の規定に検討を加え、必要な措置を講ずるとされている。その期限が平成 16 年 6 月であり、このため、生命倫理専門調査会では中間報告「ヒト胚の取扱いに関する基本的考え方について」を発表し、パブリックコメントを受けて、現在、議論が進行中である。その中で、治療的クローンを許容し再生医療研究に道を開くか否かについて、公的に検討された見解のひとつが出されることになる。

治療的クローンの是非をめぐる議論は、倫理的側面においては、主として、医学的、科学的、あるいは人道的立場からの賛成論と、宗教心や個人の倫理的確信に依拠した反対論のほか、再生医療不要論、科学的不確定性懸念論、人体資源化拡大反対論まで、多様である。これらの議論は、過去・現在を通じて単一な合意が期待できる状況ではなく、したがって、個人の権利の尊重と公益の両立を目指す基本的立場に立ち返った上での検討が求められている。すなわち、

多様な倫理観を備えた個人の自律を許容しつつ、社会の安全・安心を確保するような、国家における社会制度の整備を必要としている状況と判断できる。

7 - 2

国際連合及び諸外国における治療的クローンに関する動向

先に述べた通り、国連では治療的クローンの許容の是非に、意見の統一を見ることができない。コスタリカが提案した全面禁止に賛成の国は、米国、アフリカ諸国、バチカン、スペイン、イタリアなど 50 カ国以上の国、他方、人クローン個体に限定した禁止案は、ベルギー、ドイツ、フランス、日本など 20 カ国以上が支持している。全面禁止を主張する米国では、現在、NIH の公的資金の運用に関して制限があるのみで、人クローンを含むヒト胚の取扱いを直接規定する連邦の法律はない。つまり、民間資金によるヒト胚研究に対する連邦規制はなく、米国では民間セクターにおいてヒト胚に関連する研究を進展させてきた。大統領諮問委員会は、2002 年 7 月にクローンに関する検討「Human Cloning and Human Dignity」を、2004 年 1 月に幹細胞研究に関する「Monitoring Stem Cell Research」を、3 月には生殖補助医療に関する報告書「Reproduction and Responsibility」を発表した。それらの中では、委員会の意見が分か

れたこと、社会において議論する必要や、治療的クローンに関し、現在、生殖的・治療的双方の人クローンを禁じた法案が下院を通過したもの、上院で未だ承認されていない事実を述べるなどに止まっている。他方、現在 2001 年に行われた大統領の声明に従った ES 細胞研究の支援と規制（登録された既存の ES 細胞を用いた研究の奨励）とが NIH の管理で行われている。他方、州法がある場合にも内容は各州で異なるが、カリフォルニア州は治療的クローン（人クローン胚の作成）を許容しているとされる。

EU においては 2000 年の報告「The Ethical Implications of Research Involving Human Embryos」や 2003 年の「Commission Staff Working Paper: Report on Human Embryonic Stem Cell Research」においてヒト受精胚等の研究目的作成については、厳密な限定的条件を付すことなどを提言しているが、原則的にヒト胚の研究目的の作成や治療的クローンについて、各国の決定を尊重する立場をとっている。なお、EU 議会に出された公的資金をヒト胚研究へ拠出することを禁じる法案は、2001 年に否決されている（CNN）。

現時点で把握した範囲では、ヒト胚からの ES 細胞樹立を禁止する国に、ノルウェー、オーストリア（輸入 ES 細胞について議論中）、ドイツ（輸入 ES 細胞の許容）、フ

ランス（再検討中）、スペイン（再検討中）、アイルランドなどがある。スイスはES細胞樹立を許容するが、生殖的・治療的クローン両者を法律で明示的に禁止している。他方、治療的クローンの許容を法律において明示的に認めている、あるいは法的規制による禁止に含まれずに実質的に許容されている国としては、英国、ベルギー、韓国、中国、イスラエル、ルクセンブルク、イタリア（議論中）などが知られている（他、台湾も許

容）。フランスでは、現在議会で審議中の生命倫理法案の改定案の検討において、限定的な目的においてヒト胚を用いた研究を許容することが検討される一方、治療的クローンについては議論が分かれている。フランスにおける世論調査で、65%が、生殖と治療的クローンを区別しており、31%は同一視している。45%は、治療的クローンに賛成、20～30%が反対の結果との記載もある（the Science Generation Initiative）。また、シ

ンガポールでは、検討中の法案で治療的クローンを許容する見通しといわれる（ABC Online）。

わが国において議論が行われているように、先進諸国においてもヒト胚の扱い方が議論の対象とされており、ES細胞の許容の是非に関し、新たな局面を迎えつつあるといえると同時に、治療的クローンは、一部の国では既に社会に許容され、研究が実施されている。

8. おわりに

現在、治療的クローンを認めるか社会に賛否両論がある。社会に再生医療や研究に向けた強い要請と期待がある中では、実施を想定して、推進・反対、双方の受容と信頼が得られる手続きや制度を、社会的な議論に基づいて定める必要がある。その際に想定される体制について、科学技術政策研究所第2調査研究グループでは「生命科学技術の社会的ガバナンスシステム」として検討している¹⁵⁾。市民・社会の参画、リスク管理、医療や研究などの質的管理、被験者の人権の保護などが、包括的に行われるための、手続き・制度と

して、専門的な中間機関を核とした仕組みを提示している。中間機関とは、科学技術と社会とを適切に仲介するという意味において中間的な位置付けの機関のことである。この仕組みを治療的クローンに限定して示すと、図表7の通りとなる。わが国においては今後、市民が参画することで信頼や安心をもたらすことが可能な、ガバナンスシステムの適用を考慮すべきであろう。

謝 辞

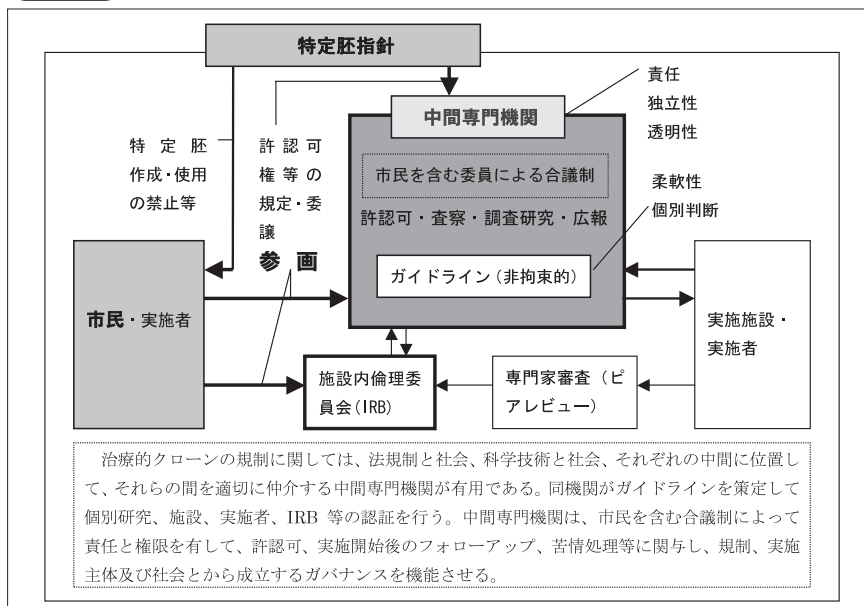
本稿執筆の機会を与えてくださった桑原輝隆科学技術動向研究セ

ンター長に、また、ご多忙の中ご教示くださいました方々、特に、若山照彦博士（理研）、西川伸一博士（理研）、寺岡慧博士（東京女子医大）に深謝いたします。

参考文献

- 1) Hwang WS, Ryu YJ, et al. Evidence of a pluripotent human embryonic stem cell line derived from a cloned blastocyst. 2004. Science 303 : 1669 - 1674.
- 2) Hochedlinger KH, Jaenisch RJ. Nuclear transplantation, embryonic stem cells, and the potential for cell therapy. 2003. New Eng. J. Med. 349 (3) : 275 - 286.
- 3) 総合科学技術会議第29回生命倫理専門調査会配布資料、議事録。ヒアリング資料：石野史敏、小倉淳郎、中辻憲夫、中畑龍俊、新川詔夫
- 4) Wakayama T, Tabar V, et al. Differentiation of embryonic stem cell lines generated from adult somatic cells by nuclear transfer. 2001. Science 292 : 740 - 743.
- 5) Cyclosporin in cadaveric renal transplantation: one-year follow-up of a multicentre trial. 1983. Lancet 29: 986-989.

図表7 治療的クローンの取扱いに関する社会的ガバナンスシステム例



- 6) 寺岡慧、唐仁原全、他。「日本における腎移植の現状」2003. 現代医療 35 : 271 - 278.
- 7) Rideout WM Ⅲ, Hochedlinger K, et al. Correction of a genetic defect by nuclear transplantation and combined cell and gene therapy. Cell 2002. 109 : 17 - 27.
- 8) 伊藤裕子「エビジェネティック・がん研究の必要性—ポストゲノム時代のがん研究—」科学技術動向 2003 年 5 月 No.26, 10 - 17.
- 9) Hübner K, Fuhrmann G, et al. Derivation of oocytes from mouse embryonic stem cells.2003. Science 300 : 1251 - 1256.
- 10) Kono T, Obata Y et al. Birth of parthenogenetic mice that can develop to adulthood. Nature 2004; 428 : 860 - 864.
- 11) Jiang Y, Jahagirdar BN, et al. Pluripotency of mesenchymal stem cells derived from adult marrow. Nature 2002 ; 418 : 41 - 9.
- 12) 総合科学技術会議第 30 回生命倫理専門調査会配布資料。ヒアリング：大濱真
- 13) The President's Council on Bioethics. Monitoring stem cell research. USA 2004.
- 14) 牧山康志「英国のヒト胚に関わる管理システム成立の背景と機能の実際—わが国における生命科学技術の社会的ガバナンスシステム構築のために—」科学技術動向 2003 年 3 月 No.24, 9 - 21.
- 15) 牧山康志「ヒト胚の取扱いの在り方に関する検討」Discussion Paper No.33 (2004 年 1 月). : <http://www.nistep.go.jp/index-j.html>

.....

特集 2

半導体微細加工装置技術の最新動向
—開発研究における日本の産学連携への提言—

情報・通信ユニット 立野 公男

1. 緒 言

今年に入りデジタル家電の盛況に引かれて日本の電気メーカの半導体や液晶製品への設備投資意欲が顕在化しており、IT バブル崩壊後の'99～'00の底を経て盛り返し段階に入っている。実際、半導体電子製品の売上高順位もルネサステクノロジー（日立・三菱統合会社）が、米国のインテル社、韓国のサムスン電子社について、名目的にはあれ3位に浮上した。これらのメーカの重要な設備投資の対象は、マスク上に描かれたLSI（大規模集積回路）のパターンを半導体ウエハ上に焼き付けるための微細加工装置であり、これは半導体や液晶デバイスの最先端製品のスペックを決定する技術

ネックを掌握する戦略的製品である。このため、半導体微細加工装置の市場シェア獲得のグローバルな競争が展開されており、今後もこの製品分野で日本が技術と市場シェアの両方で優位を保ち続けることは、半導体産業や技術のイニシアティブをとる戦略上極めて重要である。

そもそも、光学技術応用の製品分野、すなわち、光ディスク、光ファイバ通信部品、カメラ、顕微鏡、内視鏡、レーザプリンタなどでは、日本の企業が技術、ビジネスいずれの面でも圧倒的優位に立って世界をリードしてきた。この事情は本報告で取り上げる光学技術を駆使した半導体の微細加工装

置、すなわち、光露光装置において最たるものであり、最も深く、かつ先端的な光学技術を必要とする製品である。しかし、半導体の露光装置については一時、欧州のメーカにトップシェアを奪われた経緯もあり¹⁾ 今後の動向に楽観は許されない。

本報告では、益々競争の激化する半導体微細加工装置産業において、今後も日本の企業がそのお家芸である露光装置開発での国際競争力を発揮し続けるための手段の一つとしての産学連携が重要であることを示し、これが日本で本格的に実を上げて行くためにどのような方策がとられるべきかを検討する。

2. 半導体デバイス・ロードマップとリソグラフィ・ソリューション

2 - 1

半導体デバイス・ロードマップ

最近の半導体LSI分野では、情報通信機器の根幹をなすパソコンのコア部品であるMPU（Micro Processor Unit）やメモリ部品であるDRAM（Dynamic Random Access Memory）、あるいは、モバイル機器やデジタル家電用のSoC（System on Chip）について相変わらず盛んな開発競争が続いている。これらの半導体LSIは、集積度の向上を目標として進化

して来た。すなわち、DRAMの場合のハーフピッチ、あるいは、MPUの場合のゲート長と呼ばれる微細パターンの加工精度のあくなき追求である。

図表1は、集積度向上の基本トレンドを示すロードマップ²⁾である。このロードマップは、米国のインテル社をはじめとする世界の主だった電気メーカが参加して取り決めており、ITRS（International Technology Roadmap for Semiconductor）と呼ばれている。最小線幅は、当初、ミクロンオーダーであったが時代を追って微細化

の一途をたどり、DRAMについては、現在90nmノード（節目）での量産体制に向かおうとしている。この線幅に対応するDRAMのメモリ容量は4ギガビットである。そして、15年後には、線幅18nm、メモリ容量128ギガビットという驚異的な目標が立てられている。

2 - 2

リソグラフィ・ソリューション

このようなITRSロードマップにおけるLSIの微細パターンは、

リソグラフィ技術を駆使した微細加工装置によって作成され、各ノードにおけるリソグラフィ・ソリューションと呼ばれている^{3~5)}。これらの装置は、紫外線や電子線を光源としており、図表 2 に示すように大きく分けて 2 種類ある。以下これらについて概要を述べる。

第一は、紫外線を発する ArF (アルゴンフロライド) や F₂ (フッ素ガス) レーザを光源とした光学的方法であり、いわゆるステッパー、あるいは、最近ではスキャナーと呼ばれている。この方式は、図表 3 に示すように、光の空間的な並列処理機能、すなわち、マスクパターン上のすべての点を同時にウエハ上に焼き付けるという極めて有益なメリットをもっている。そのためスループットが高く量産が可能で最も実績があり普及している。光源の波長が世代を追って短くなる理由は、次式で与えられる露光装置のレンズ光学系の解像度、いわゆるアッペの式 (レーレーの式とも呼ばれる) によって線幅が決まるからである。

線幅: $\delta = k \cdot \lambda / NA$
(λ : 波長、NA: レンズ開口数、 k : Engineering factor) ……①

図表 1 半導体デバイスロードマップ (単位は nm)

デバイス/年度	2004	2007	2010	2012	2015	2018
DRAM	4 Gb	8Gb	16Gb	32Gb	64Gb	128Gb
ハーフピッチ	90	65	45	32	22	18
コンタクトホール	110	80	55	45	35	25
合わせ精度	32	23	18	14	10	7.2
線幅バラツキ (3 σ)	11	8	5.5	4.3	3.1	2.2
MPU						
ハーフピッチ	107	76	54	42	30	21
ゲート長	53	35	25	20	15	10
コンタクトホール	122	80	59	46	33	23
線幅バラツキ (3 σ)	3.3	2.2	1.6	1.3	0.9	0.6
SoC						
ASIC/LP ゲート	75	45	32	27	19	13
コンタクトホール	122	80	59	46	33	23
線幅バラツキ (3 σ)	4.7	2.9	2	1.7	1.3	0.8

ITRS ホーム・ページの表をもとに政策研で作成

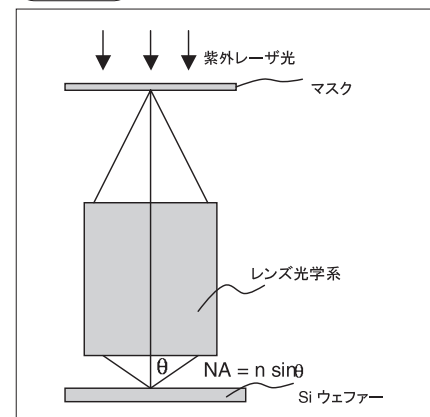
ここに、NA は、Numerical Aperture (開口数) の略であり、ウエハから見たレンズ開口の見込み角の半分を θ (図表 3) とした時、 $NA = n \cdot \sin \theta$ で与えられる。ここで、本年 2 月米国のシリコンバレー (Santa Clara) で開催された Microlithography2004⁶⁾ に於いて本命技術としての位置づけが確認され、ブレイクスルーとなった液浸技術を説明する。この技術は、既に量産に使用されている上記 ArF レーザを光源とする

露光装置の延命をはかる技術であり、対物レンズの先端とウエハの間の空間を純水で浸し、実効的な NA を純水の屈折率 1.4 分だけ向上する技術である。式①を見れば解像度が上がることは一目瞭然である。また、焦点深度も向上するため、装置の機械的な位置制御の精度が緩和されることも大きなメリットである。液浸レンズはオイルを用いた超高解像の顕微鏡として古くから知られているが、量産用露光装置への適用は初めてで

図表 2 リソグラフィ・ソリューション

年度	2004		2007	2010	2012	2015	2018
ITRS Node	130nm	90nm	65nm	45nm	32nm	22nm	18nm
光学式	KrF (248nm)						
	ArF (193nm)		液浸 ArF + RET				
	F ₂ (157nm)			液浸 F ₂ + RET			
	EUV (極紫外 13.5nm)						
電子線方式	EPL (電子線投影露光装置)						
	LEEPL						

図表 3 光学式露光装置の模式図



あり、解像度 60nm が部分実験で実証され、マスクパターンが単純な繰返し形状であれば 45nm から 32nm まで加工できる可能性を持っている。

第二が、さらに波長の短い電子線をビーム源とする露光装置である。その代表的な装置が、EPL (Electron Projection Lithography) である。これは、電子ビーム (波長 0.1nm 以下) をマスクパターンに当て、ウエハ上にマスクパターンの像を縮小投影して露光する技術である。この装置は同時に露光できる面積が狭いため、光学式に比べてスループットが不利であり、いわゆる量産機として採用された実績はない。しかし、解像度、焦点深度いずれも光学式よりも有利なため、光学式では加工が困難なコンタクトホールなどの孤立パターンの露光用として併用される可能性を持っている。また、特殊仕様向けの LSI の微細加工に向かうという見方もある。

一方、マスクをウエハに近接し、電子ビームでそのまま転写する LEEPL (Low-energy electron-beam proximity-projection lithography) も提案されている。現在 65nm の解像度が実験的に確認されており、45nm へ向けての開発が行われている。EPL に比べて装置が比較的安価でありスループットも高い点有利であるが、マスクが等倍であるためマスク自体の生産が高価となるなど課題も多い。

以上、電子線を用いた露光装置は光学式が限界に達した場合に取ってかわるべき装置として従来から開発されてきた。しかし量産に必要なスループットが光学式ほど向上していないため、現在は主としてリソグラフィの研究用や原版となるマスクの微細加工装置としての役割を担っている。

2 - 3

次々世代： EUV / F₂ リソグラフィ

これまで述べてきたように液浸ブレイクスルーにより、ITRS 上で 45nm ノードは確実、ひいては、32nm ノードまでの見通しがついたが、その先はどうなるのだろうか？ この問いに答えようとしているのが、次々世代リソグラフィと言うべき EUV (Extreme Ultra Violet) 露光技術と F₂ リソグラフィ技術である。

EUV 技術は、元 NTT に在籍し現在は兵庫県立大学に所属する木下教授の発案であり、日本発の誇るべき技術の 1 つである。これは、例えば高真空中でノズルから噴出する水に超高出力レーザ光を照射して生じる高温プラズマから発生する、波長 13.5nm の極紫外光を用いたリソグラフィ技術である。この分野でも、日欧米の競争は激化している。特に、EUV 光を透過するガラス材料がないため、反射ミラーが使用される。そのため、従来の光露光装置とは、技術的な連続性が相当部分失われることになる。したがって予算的にも EUV 露光装置の開発には、基盤技術、計測技術、および、実用化技術を含めて開発費 430 億円が必要と推定されている。この額は ArF リソグラフィの 150 億円、F₂ リソグラフィの 200 億円を大きく上回り、1 社負担は無理である。

従って、このような EUV 技術は、欧米では、欧州の MEDEA + ⁷⁾ (Microelectronics Development for European Applications +)、米 国 の EUV LLC ⁸⁾ (Limited Liability Company)、VNL (Virtual National Lab./ Lawrence Berkeley, Lawrence Livermore, Sandia)、お よび、ISMT ⁹⁾ (International SEMsATEC) にお

いて、豊富な資金をバックに産学官連携で推進されている。この背景から日本では経済産業省の担当で、NEDO の支援を受けて 2002 年 6 月～2005 年 3 月の期間で「技術研究組合 極紫外線露光システム応用技術開発機構；EUVA (Extreme Ultra Violet lithography Association) ¹⁰⁾」が産学官連携コンソーシアムとして走っており、国際競争の中で装置コスト削減を含む将来技術の開発が進められている。これらの背景から、2003 年秋にインテル社は、32nm 以降のリソグラフィは EUV 露光に集中し F₂ リソグラフィはスキップすると宣言した。しかし、EUV 露光は、実績の乏しいミラー光学系や EUV 光源の新開発が必要であり、膨大なコストも含めて多くの難題をかかえている。

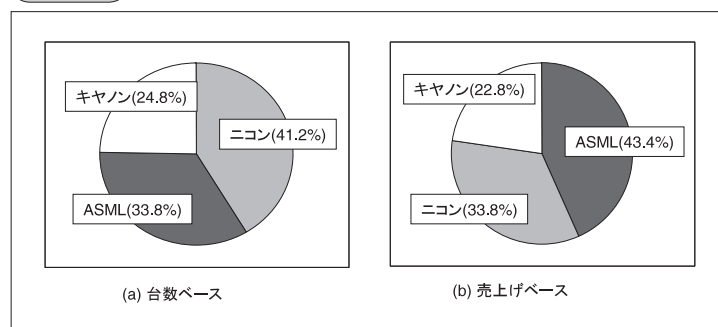
一方、F₂ リソグラフィ装置は、レンズ材料として CaF₂ (カルシウムフロライド) の大型結晶育成の量産化技術などいくつかの課題を残している。しかし、露光方式としては豊富な実績を持つ光学式の延長にあるため EUV よりも有利に展開される可能性もある。現に、2003 年 4 月 ASML 社は、欧州 の IMEC ¹¹⁾ (InterUniversities MicroElectronic Center) に価格が 120 億円以上の F₂ 露光装置の試験機を納入しており、量産化のための技術課題の先取りを行っている。ASML 社の光学系は、世界の光学技術の老舗であるツァイス社 (Zeiss / 独) が受け持っている。これらに対し、日本の F₂ リソグラフィ技術は、Selete ¹²⁾ の「あすかプロジェクト」の中で 2006 年 3 月末完了を目指して進められている。その先の戦略として F₂ で行くか、EUV で行くかの選択には、技術だけでなく開発期間と膨大な投資額などが複雑にからむため、相当高度な判断力が要求される状況である。

3. 世界市場シェアと日本企業の国際競争力の現状

半導体デバイス製品そのものの世界市場シェアでは、日本企業がトップの座を奪われて 10 年になろうとしている。しかし、今年に入りデジタル家電やモバイル機器の盛況や企業再編の効果もあって、ルネサステクノロジー（日立・三菱統合会社）の売上高順位が、米国のインテル社、韓国のサムスン電子社について名目的にはあれ 3 位に浮上した。これに伴い、日本の電気メカの半導体や液晶製品への設備投資意欲が顕在化しており、日本のメカにとって半導体微細加工装置の国際競争力を盛り返すチャンスが訪れようとしている。そこで、本報告の主題である半導体微細加工装置の世界シェアと日本企業の国際競争力を調べる。

図表 4 は、最近の半導体露光装置の世界シェアである。市場は、世界に冠たる日本の光学メーカーであるニコン、キヤノン、そして、光学技術の伝統を持つツァイス社の光学系を搭載した ASML 社（Philips 系列／オランダ）の三社に寡占化されている。図表 4 中(a)は台数ベース、(b)は売り上げベ

図表 4 2003 年度の光露光装置世界シェア



(株)プレスジャーナル社のデータをもとに政策研で作成

スである。台数ではニコンがトップである。ところが、売り上げでは、ASML 社がトップである。これまで、半導体製造装置の分野では、日本のメカは、技術・ビジネス両面で世界を圧倒的にリードして来た。しかし、ビジネス面では最近顧客サービスを重視し、使い勝手を改善した製品を市場へ投入した欧州の ASML 社に追い越される局面もあり苦慮している。値段が高いのに顧客は ASML 社製を選ぶのである¹⁾。日本企業が今後も国際競争力を保持し向上して行く上で、使い勝手やメンテナンスを重視した「顧客サービス」の一層の改善が期待される。

一方、アメリカにおいては、従来、コダック社やパーキン・エルマー社のような光学メーカーがカメラや計測機器をはじめとする光学機器の分野で健闘していたが、現在は競争力を失っている。光露光装置においても一時、SVGL 社が活躍していたが、数年前に ASML 社に買収された。このように、アメリカのリソグラフィ装置産業には活力がなくなっている。にもかかわらず、後述の液浸技術ブレイクスルーに見られるようにアメリカの大学の研究開発力の方は相変わらず活力に溢れており、現場の最先端の技術課題に敏感に反応している。なぜこうなのであろうか？

4. 日本企業の技術優位性と米国の大学の活躍

以上で、半導体微細加工のロードマップと対応するリソグラフィ・ソリューションを技術的に解説し、半導体のデバイスと微細加工装置の世界シェアをレビューした。次に、このような状況の中で本報告の中で特に吟味されるべき 2 つの象徴的な事例を取り上げ、半導体産業における日本の国際競争力についての分析を試みる。その 1 つは、特に日本の企業がこれまで光学メーカーと電機メーカーの産々連携によって基礎的な段階か

ら実用まで強みを発揮してきた超解像技術であり、もう 1 つは数年前から液浸技術ブレイクスルーのきっかけをつくったアメリカの大学の活躍ぶりである。

4 - 1

超解像技術における日本企業の産々連携

第 2 章の式①によれば、光源の波長とレンズの開口数が同じであっても、k-factor を小さくする

ことにより、半導体の微細加工の最小線幅をより細くすることができる。これに対応する技術が RET (Resolution Enhancement Technology) であり、その代表的なものが、図表 5 に示した位相シフト法である。これは、マスクパターンの隣同士の位相を 180 度シフトさせ、電場の強度分布を二分することでリソグラフィの解像度を約 2 倍向上する技術である。この基本アイデアは 1980 年に当時ニコンに在籍し、現在は東京工芸

大学に所属する渋谷真人教授が発明し、ニコンから特許申請¹³⁾された。その後、IBM 社において M. D. Levenson 氏が独立にその効果を実験的に証明し、さらに、日立製作所の岡崎信次博士らのグループが実用化への道を開いた。

図表 6 は縦軸に位相シフトマスクに関連する特許の数を示しており、日本の企業がこの技術分野で圧倒的にリードした事実を読み取ることができる。この事実は、リソグラフィ技術分野の権威の一人である Mentor Graphics の Frank Schellenberg 氏が、前述の国際会議、Microlithography2004 にて、“Resolution Enhancement Technology: The Past, the Present, and Extensions”¹⁴⁾ と題する基調講演でレビューしたものである。位相シフト法は、繰り返しパターンへの適用に限られ、コンタクトホールなどの孤立パターンへの適用は困難であるが、光源の波長は問わないので、KrF、ArF、F₂ いずれの露光装置にも適用できる汎用技術である。

すなわち、光リソグラフィの 1 つのブレークスルーとなった超解像技術は、日本の企業が世界に先立って生みだし、アメリカの企

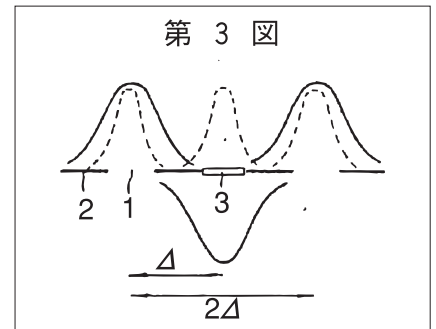
業が育て、日本の企業が実用化して世界を圧倒的にリードしてきた事例であるといえる。つまり、日本の企業の技術がこれまで単に量産技術や歩留まり向上に寄与していただけではなく、かなり基礎的な技術課題の解決策をも生み出していたことを我々は認知すべきである。因みに、この国際会議 Microlithography2004 において、今回から、位相差顕微鏡でノーベル賞を受賞したオランダの Zernike（ゼルニケ）の名を冠した Award が新設された。今回は、次節で述べる液浸技術を推進した B. J. Lin 氏が受賞したが、今後、RET 技術に関する実績が受賞の対象となる可能性が高い。

4 - 2

液浸ブレークスルーと MIT の技術センス

以上のように、超解像技術を端的な例として、光リソグラフィ技術においては、全般的に日本の技術陣がリーダーシップを取り続けてきた。しかし、第 2 章で述べたように次世代リソグラフィ・ソリューションについては技術選択肢^{3~5)}が多く、本命技術がこれらのうち

図表 5 位相シフト法の原理



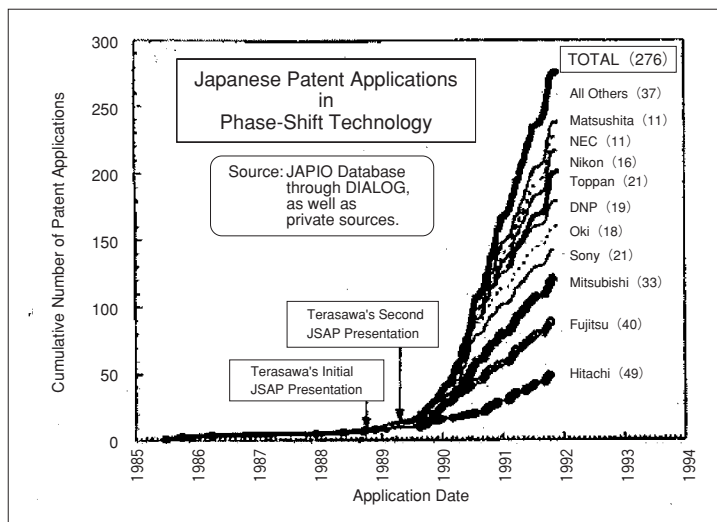
マスクパターンの隣同士の位相を 180 度シフトし、解像度を約 2 倍向上

どれになるか混沌としていた。そして、露光装置の開発メカは、国の内外を問わず本命技術を絞りきれず開発投資額が膨大なものとなり今後回収できるかどうか危惧されていた。

このような状況下で、本年 2 月に米国のシリコンバレー (Santa Clara) で開催された Microlithography2004⁶⁾ に於いて 65nm 以降のブレークスルー技術として ArF の液浸技術の実用化に関しニコン、ASML 社、および、キヤノンから競って発表され各社とも本命技術としての見通しが立ったと述べた。そして、年内、あるいは、来年ははじめの製品化に向けて技術開発競争はもとより、トップシェア争奪の受注競争が始まっている。このため、リソースの選択と集中、すなわち、他のリソグラフィ技術の選択肢に携わっていた技術者の液浸式 ArF ステッパ装置開発へのシフトが行われている。

そこで、この注目すべきブレークスルー技術が本命技術として表舞台に立つに至った経緯を調べる。この液浸技術は、前述のアップの解像度の式①で明らかのように光学顕微鏡の解像度を上げる技術として教科書に掲載されているほど良く知られた技術である。実際、今回発表のような液体循環式リソグラフィとしての発明は、遡れば 80 年代のはじめに出

図表 6 RET (Resolution Enhancement Technology) 技術の筆頭にあげられる位相シフトマスク関連特許数の推移



F. Schellenberg 氏の Microlithography2004 における発表資料より

願された日立製作所の高梨明紘氏らの特許¹⁵⁾がある。しかし、技術の選択肢として前述の位相シフトマスクなどの RET (Resolution Enhancement Technology) 技術開発の方が優先度が高かった。そのため液浸技術は長らくお蔵入りであった。しかし、最近では、その RET 技術も出尽くしている感があった。

このような背景で 2001 年、MIT の Lincoln Laboratory の M. Rothschild 氏らが、波長 157nm の F₂ レーザを用いた液浸リソグ

ラフィ実験をタイミング良く発表¹⁶⁾した。その後、IBM 社から台湾のメーカ TSMC 社に移った B. J. Lin 氏らが理論的検討を進めて 45nm ノードまで実用可能であるという見通しを立て、実用化を強く主張した。そして、ニコンの大和壮一博士らが 2003 年の Microlithography 学会にて液浸のハンドリング技術であるローカルフィルというアイデアを発表し量産機への適用が可能であることを示した。これにはずみがついて、ASML 社やキヤノンも液浸のシ

ミュレーションや実用実験をさらに押し進め、年内、あるいは、来年早々の出荷を目指して 3 社による熾烈な製品化競争が展開されるに至った。以上の経緯を見ると、MIT の技術陣が当初どこまで先行きを見通していたかは不明であるが、少なくとも光リソグラフィの現場の最先端の技術課題に敏感に反応し、今回の液浸技術ブレークスルーのきっかけを作ったことは確かである。

5. 日本の産学連携の問題点と今後の進め方

5 - 1

日本の産学連携の問題点

今回のリソグラフィ・ソリューションのブレークスルーとなった液浸技術は、前述のように MIT (Massachusetts Institute of Technology)、Lincoln Laboratory の Prof. Rothschild らによってきっかけが作られた。この研究室は、DARPA のファンド (No. F19628-00-C-0002) を受けて光リソグラフィの極限追求をテーマとしており、以前から F₂ (157nm) レーザを用いた露光実験などを通じて技術開発の最前線の一環を担っていた。すなわち、企業の現場が行っている実験と同じレベルの実験をしており、最先端の技術課題を掌握していた。従って、今回のブレークスルーのきっかけを作ったのは必然であったということもできる。この例にみられるようにアメリカの大学は、日本の大学¹⁷⁾よりも企業の現場の最先端の技術課題に敏感に反応する。だからこそ大学からブレークスルーが出るし、ビジネスに根ざした本格的なベンチャーが育つ確率が高い。

本論文は、今回の MIT の例で

みられるような大学の生産技術部門が担っている応用研究の進め方について議論しており、例えば素粒子研究のような純粋な研究部門のことを対象にしているわけではない。ところが、日本の大学では、応用研究部門の領域であっても、将来への布石としての基礎研究と称されるテーマが多く、それが大義名分のようになっている。そしてさらに、基礎研究といっても実体はどちらかという技術の本流からはずれたところで研究テーマを設定してしまう傾向がある。論文数を稼ぐ目的に沿うかもしれないが、論文発表だけで終わってしまうケースが多くみられる。たとえば、今回の Microlithography2004⁶⁾のような、技術の本流を議論する場において、アメリカの大学からの発表件数が 25 件であったのに対し、日本の大学からの発表は数件であった。しかも、今回の Microlithography2004⁶⁾での MIT や Rochester 大学の例に見られるように、アメリカの大学から発表されるデータの取り方やシミュレーションの結果が、企業から発表されるものに肉薄しており、技術の本流への寄与に迫力が感じられ

た。これに比べ日本の大学からの発表は、アイデアを概念や図面で発表するにとどまり、データも写真程度である場合が多く見受けられる。筆者がかつて携わった光ディスク分野の学会発表でも、写真だけでなく例えば信号対雑音比や効率のデータにまで踏み込んだ形であれば、その技術の素性がもっと明確になるのという隔靴搔痒の思いを何度か経験したことがある。

このように日本の大学が技術の本流に踏み込みにくくしている理由は何であろうか？ 1 つには、大学によっては研究設備が不足しているという要因がある。例えば、上述の信号対雑音比や効率のデータをとるには、それなりの高価な測定機器が必要であり、大学によっては、それらの機器を備え切れないという場合もある。しかし、本論文で強調したいのは、例えば先端的なデバイス設計の方法や測定方法のノウハウなどを含んだ技術の本流にある最先端の技術情報を大学がつかみ切れていないのではないかという問題である。これは、大学が企業の現場から学ぶのが最も手取り早いので、企業サイドから開示されると都合がよい。

ところが、そこには、企業機密の問題が立ち上がる。機密保持は企業サイドとしては当然のことである。しかし、企業の自前主義の限界が盛んに問われている昨今にあって、企業側も機密保持や技術情報の囲い込みに専念していると技術が閉塞してしまう。そのためには、企業が情報を大学に開示してもその権利が保証され、企業が安心して大学と技術交流ができるような体制が土台になければならない。

すなわち、法律に基づいたきちんとした機密保持に関する対等の契約（NDA：Nondisclosure Agreement、あるいは、EA；Exclusive Agreement）を大学と企業の間で交わし、互いの技術交流を経て双方が Win - Win の成果が得られるような姿に変革して行くべきである。ところが例えば、大学での研究には学生が携わるため、卒業後の就職先に機密が漏れる懸念があるという指摘がある。しかし、それは、学生も含めた NDA を結べば解決する問題と思える。

以上の議論から、日本の大学の応用研究部門における産学連携の進め方の課題はファンディングの問題以外に、少なくとも2つの視点から検討させなければならないことが分かる。1つは、大学のTLOなどが担当する発明の特許化技術に関する課題であり、もう1つが発明そのものを生み出す研究開発の進め方に関する課題である。以下これらについてそれぞれ論考する。

5 - 2

日本の大学の TLO と MIT の ILP の現状

先ずはじめに上げた産学連携にまつわる特許などの機密保護の業務は、我が国の大学では

TLO¹⁸⁾ (Technology Licensing Organization / 技術移転機関) が受け皿になることになっている。TLO の主なミッションは大学の研究成果を特許化し企業に技術移転すると共に、得られた対価を大学の更なる研究資金に充てる事を目標としており、大学の研究者の研究成果を発掘・評価し、特許化及び企業への技術移転を行う法人で、いわば大学の「特許部」の役割を果たす機関である。时期的には、今からおよそ6年前の1998年8月に施行された「大学等技術移転法 (TLO 法)」に基づいて発足し、現時点で全国で36カ所が認可設立されている。

これに対し、アメリカの産学連携の歴史は古く、例えば MIT¹⁹⁾ では TLO だけでなく、ILP²⁰⁾ (Industrial Liaison Program) と呼ばれる組織が1948年に発足している。知財保護業務を扱う TLO に対し、ILP は、技術的な懸案事項を扱う機関であり、50年以上の蓄積があって Innovation Value Chain の一環をなしている。Innovation Value Chain とは、技術イノベーションから資金回収に至る価値創出の連鎖、つまり、基礎研究 - 応用研究 - 製品化 - ビジネス - 研究投資のサイクルの生産的な連鎖である。昨年の例では、645社が MIT に出資し、うち21社が100万ドル以上、139社が10万ドルから100万ドルの間の出資を行っている。また、MIT の卒業生は、1997年までに4,000社を超える会社を創立し110万人の雇用を創出しておよそ2兆5千億円の売り上げを達成している²⁰⁾。そして、MIT などを含む北米全体の産学連携による2002年度の特許収入は、約1,453億円に達する²¹⁾。

一方、日本の TLO の特許収入は増加傾向にあるものの発足から2003年度までで、通算約14億円²²⁾である。もちろん、TLO の

本格始動が比較的最近であることを考慮すべきであるが、その経営は特許収入という観点から見て多くの課題を将来に残している。そこで特許の収入を基礎研究から求めようとする考え方がある。しかし、実際のところ基礎研究が製品にまで育つケースは極めてまれである。また仮に基礎研究が実用化されても研究開発は通常20～30年の年月を要し、基本特許を書いても製品が市場に出るころには期限が切れている場合が多い。

したがって、大学から出願される特許は、基本発明だけでなく実用化の工程において持続的かつ網羅的に周辺特許を出願し特許網を構築して行かねばならない。このような進め方は、特許収入で実績を踏まえた経験のある企業との産学連携による協力体制がなければ現実とはなり難い。また、特許の権利維持のためには相当の費用がかかる。そのため、既に出願済みの特許の権利を維持するかどうかのスクリーニングの工程をさらに厳しくして行かねばならない。これらは、発明の権利化の効率を高めるための特許技術の問題である。次にもっと肝心な発明自体を生み出すものとなる研究開発そのものの進め方について、前節で強調した日本の産学連携の問題点を受けて次のような前向きな解決策の1つを提案する。

5 - 3

日本の産学連携をより有効に進めるには

その解決策は、先ず第一に、前述のように日本の大学の少なくとも生産技術部門に属する研究者が、従来以上に深く企業の開発現場に足を踏み入れて、先端の技術課題を企業の技術者と共有して行くことである。そこで必ず浮上する知財の管理と保護の問題は、大

学や公的研究機関で設置されている前述の TLO を有効活用することである。しかし、現状の TLO は大学サイドの権利を守ることを主な使命としている。これではさらに有効な進展は望めない。

従って、解決策の第二は、TLO の使命として大学の利益を保護するだけでなく、企業サイドの権利を守る手立ても考慮し、大学と企業が相互に対等な法的契約関係を構築して行くことである。でなければ、企業サイドは現状より以上、大学に接近することはなく、さらに進んだ生産的な産学連携は成立しない。そして第三に、企業サイドも、現場の技術課題を宝の持ち腐れとせず、企業の知財管理部と大学の TLO の監視のもとで大学に積極的に技術課題を開示し、大学の研究者の優秀な頭脳を活用することである。

これら 3 つの手だてが解決策のセットとして推進されれば、双方がその技術情報を互いに開示してもその権利が保証されることになり、安心して技術交流ができるようになる。つまり、学会や研究会でのレベル以上に踏み込んだ議論を双方の研究者、技術者が行えるようになり、双方の科学的な知識や技術がより活性化され新たな進歩が生まれるチャンスが増えるはずである。

そして、もっとも高度な判断を必要とする事業的な成功の見通しについては、双方の経営者レベルの責任者が会議をもって総合的に

判断する。すなわち、重要なテーマ毎に大学と企業が対等な法的契約関係をベースとするギブアンドテークのルールにまず合意する。そしてそのルールの元に双方の先端技術や製品開発の経験者が集まってプロジェクト体制を敷き、実用化目標の達成に向けた工程を果敢に実行して行くことが開発研究における世界に通用する本格的な産学連携の姿となるのではないか。このような進め方は、実は、企業同士の産々連携で現実に頻繁に行われ、多くの実績が上げられていることである。

5 - 4

国際的な Innovation Value Chain への参加

最後に欧米における産学連携の研究資金面について言及する。すなわち、本報告の半導体微細加工技術の分野では、アメリカでは、ISTM⁹⁾ (International SEMATEC) というコンソーシアムが重要な役割を果たしている。ISMT は MIT をはじめ、Rochester 大、New Mexico 大など多くの米国の大学に日本とはけた違いに大きい研究資金を投入している。また、2002 年の春から 2003 年の末までの研究成果が本年 2004 年の 1 月末に ISMT 主催の会議で報告されているなど活発な成果発表とその評価が定期的になされている。一方、欧州では、ベルギーのルーヴェン市に前述の

IMEC¹¹⁾ という機構が整備されており、半導体産業の産学連携の拠点の 1 つとなっている。

日本においても、これらの動向に注意しながらより生産的で健全な産学連携を推進すべきである。すなわち、前節で述べたような欧米では当然の事として行われている法的な契約関係、すなわち、一方が他方を支配するのではなく、ギブアンドテークの対等の立場をとることを基本にした契約的な運営方法を国内の企業と大学の間で実績として積むことである。これが地についてくれば、今度は、海外の大学、あるいは、海外の企業との間でのギブアンドテークを基本とする技術協力に発展し、日本の大学も各国の技術力がからみあう国際規模の Innovation Value Chain の一環を担うところまで成長できるのではないか。例えば、端的に言ってインテル社が研究資金を投入する気になるような魅力的な技術ポテンシャルを日本の大学の生産技術的な分野を担う部門で育まれることも視野に入ってくる。

そして、具体的には、本報告で取り上げた光リソグラフィの分野において次世代の技術イノベーションを生むと期待される前述の EUVA という場や F₂ リソグラフィ技術の開発に関係している企業と大学や公的研究機関が、以上の課題をどのようにクリアするかが今後の注目点となる。

6. 結 言

以上、本報告の前半の第 2、3 章において最近の半導体デバイス製品、および、半導体微細加工装置の技術動向と世界シェアによる日本の国際競争力を本報告の背景としてレビューした。そして、後半の第 4、5 章では、前半で述べ

た技術動向から日本の産々連携とアメリカの産学連携の進め方についての分析を試みて、本報告の問題意識を浮き彫りにした。そして、最後に、開発研究における日本の産学連携の進め方について、従来よりも一歩踏み込んだ提言を行っ

た。すなわち、

- ①最近のリソグラフィ・ソリューションの新たなブレイクスルーとなった液浸技術を例に見ると、アメリカではビジネスとしてのリソグラフィ装置産業の

国際競争力がなくなっているにもかかわらず、ブレイクスルーのきっかけが、アメリカの大学 (MIT) で生じている。それが可能であった理由は、アメリカの大学が、国内だけでなく世界中の企業の開発現場がつくっている技術潮流の中に最先端の技術課題を見つけ出し、かつその課題にタイミング良く敏感に反応しているからである。

- ②すなわち、世界中の企業の開発現場は、マーケットニーズと科学的な知識シーズの接点であり、発明や発見を生み出すものとなる最先端の技術課題を内包しながら技術の潮流を作っている。したがって応用研究に携わる日本の大学の研究者は、そこへ従来以上に深く足を踏み入れて、先端の技術課題を企業と共有して行くべきである。

そこで必ず知財の管理と保護の問題が浮上するが、現在大学や公的研究機関で設置されている TLO が、これまでのように、大学サイドの権利を守るためだけでなく、企業サイドの権利を守る手立ても考慮した相互に対等な法的契約関係を構築して行く必要がある。でなければ、企業サイドは現状より以上に大学に接近することはなく、技術情報を開示することもない。これでは真に生産的な産学連携は進まない。さらに企業サイドは、現場の技術課題を宝の持ち腐れとせず、企業の知財管理部と TLO の監視のもとで大学に積極的に開示し、大学の研究者の優秀な頭脳を活用すべきである。

そして、現状の TLO がかかえている発明の権利化の効率を高めるための特許技術も考慮されなければならない。すなわち、産学連携に携わる大学の研究者は、ヒットすれば大きいがその確率は極めて低い基本特許を狙

うだけでなく、実用化の推進過程で生み出される周辺特許も企業の研究者と協力して持続的かつ網羅的に出願し、特許網を構築して行かねばならない。また、特許の権利維持には費用がかかるため、既出願特許のスクリーニングの工程を企業の特許業務経験者と協力してさらに厳密にして行かねばならない。

- ③以上のような特許技術を含む対等な法的契約関係をベースとする企業と大学のギブアンドテークのルールの合意の元に、双方の先端技術開発や製品開発の経験者が集まってテーマ毎にプロジェクト体制を敷き、実用化と特許取得目標の達成に向けた工程を果敢に実行して行くことが、開発研究において国際的に通用する本格的な産学連携の姿である。このような進め方は、実は、企業同士の産々連携で現実に頻繁に行われ、多くの実績が積み上げられている。

今後、日本の大学が参加している次々世代のリソグラフィ・コンソーシアムである EUVA や、F₂ リソグラフィ技術の進展が以上の提言からの注目点となり、TLO を含めて上手く機能するかどうか試される。そして、国際的に通用するギブアンドテークの対等な契約に基づく産学連携の地道な実績を積んで行けば、国内だけでなく、国際的な Innovation Value Chain の一環を日本の大学も担うようになるはずである。

最後に本論文の対象について再確認する。すなわち、本論文は、タイトルの副題に付けたように大学の応用研究部門に属する研究者が、企業の研究開発に携わる研究者と共同で推進する開発研究についての産学連携の問題を対象としている。そして、これを従来以上に実効的なものにして行くための

方策について検討したものである。

産学連携の問題は、歴史的には、産と学の接触が頻繁になった産業革命以後に生じた。これに対し、人間の知的活動は、当然の事ながら、産業革命よりもずっと以前からなされている。すなわち、この不可思議な自然や社会という研究対象から、産業や政府を介さず、じかに刺激を受けて知的好奇心を抱き、そこを出発点として自発的に知の創造と体系化を進める能力のある自律的な人々が古くから存在した。このような人々とその教えを求める人々が集まってできたのが大学の始まりであるという説がある。この説は、知識の伝承、すなわち教育という問題と合わせて大学の本来の使命は何かという根本的な問題に繋がり、大学の存在の本質を問う問題である。従ってこの問題は、産学連携という今日的な捉え方のみでかたづけられるべき軽い問題ではない。大学の誕生、すなわち、産業革命やルネサンスはもとより、ギリシャ、そして、エジプト、メソポタミア、インダス、中国の 4 大文明の発祥、さらには、人類の始まりにまで遡った事実に基づく深遠で真摯な議論によって論じられるべき極めて重い問題である。

謝 辞

本特集をまとめるに当たり、貴重なご助言を頂いた(株)ニコンの大和壮一博士、(株)ソニーの小笠原敦氏、そして、(株)日立製作所の岡崎信次博士、福田宏博士の各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) H. Chuma & Y. Aoshima ; RIETI Discussion Paper Series 03-E-003
- 2) <http://public.itrs.net/Files/2003ITRS/Home2003.htm>
- 3) 笹子勝、遠藤正孝：「リソグラフィの最近の話題」応用物理第 73

- 巻第 2 号 (2004)
- 4) 笠間邦彦：「次世代リソグラフィの展望」OPTRONICS (2003) No. 4 pp106-pp110
 - 5) 小笠原敦：「科学技術動向」2001 年 5 月号 (文部科学省・科学技術政策研究所)
 - 6) Technical Summary Digest ; SPIE 29th Annual International Symposium on "Microlithography" , (22 - 27 Feb. '04, Santa Clara)
 - 7) http://www.medeo.org/web/public/meo_brochure.pdf
 - 8) 齊藤 旬：「科学技術産業振興策としての LLC (Limited Liability Company) 制度」O+E, Vol. 25, No. 8 (2003)
 - 9) <http://www.sematec.org/>
 - 10) <http://www.euva.or.jp>
 - 11) http://www.imec.be/ovinter/static_general/start_en.shtml
 - 12) <http://www.selete.co.jp/>
 - 13) 渋谷真人：特開昭 55 - 136484
 - 14) F. Schellenberg; SPIE Milestone Series, Vol. MS 178 (2003)
 - 15) 高梨明紘ほか：特開昭 57 - 153433
 - 16) M. Switkes and M. Rothschild, J. Vac. Sci. Technol. B 19 (6) , Nov/Dec 2001, pp2353 - 2356
 - 17) 奥和田久美：「科学技術動向」2003 年 4 月号 (文部科学省・科学技術政策研究所)
 - 18) <http://www.jpo.go.jp/kanren/tlo.htm>
 - 19) 黒田玲子「科学を育む」中公新書 p125 - 149 (2002)
 - 20) <http://www.mit.edu>
 - 21) http://www.autm.net/index_2004annual.html
 - 22) <http://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/ip/haihu16/siryo4-1.pdf> または、http://www.meti.go.jp/policy/innovation_corp/top-page.htm

.....

特集③

“知的コンピューティング”に向けた研究動向
—認知科学と人工知能の複合領域研究の推進—

情報・通信ユニット 巨理 誠夫

1. はじめに

日本ではブロードバンド加入者が1,500万人になり、世界一速くて安い環境ができ、ユビキタス社会がすぐ目の前に来ていると言われている。しかし、従来IT機器は専門家が使用することを前提に設計されてきており、広く普及した現在も、まだ一般の人には使いにくい設計が多い。さらに、インターネットの拡大により、多くの情報が容易に入手できるようになったが、情報が氾濫し膨大なデータから意味のある情報を取り出すのは簡単ではない。コンピュータを自然に使い人と親和性の高いコンピュータが望まれており、それが実現できれば、人とコンピュータの共同作業がスムーズに進み、知的生産性を向上させることができる。

人間の知的活動を支援する能力と、人間との自然なインターフェースを持つ、“知的コンピューティング”を実現する研究は、人工知能分野で進められてきた。コン

ピュータ上に知能を創ろうとする人工知能の研究はコンピュータが作られて間もない1950年代後半から開始されているが、その人工知能の知的能力はなかなか向上せず、研究に対する非難の声もあった。しかし、コンピュータの処理速度が向上するとともに、実現される知的処理の性能も向上し、その研究成果は人工知能としては見えにくい形であるが断片的に多くの情報システムに組み込まれ実用化されている。最近では、機械学習アルゴリズムを取り入れたデータマイニング研究が盛んになり、セキュリティ技術の発展に大きく貢献している。

しかし、現在の“知的コンピューティング”の知的処理レベルは人間と比べまだ劣り、その向上が望まれている。そこには、人間の本質解明に迫る困難な研究を含め、多くの研究課題が残されている。特に、人間の認知機能を解明しようとする認知科学の研究

から、“知的コンピューティング”の新しいアイデアが創出されてくることが期待されている。

この“知的コンピューティング”の実現を目標に、人工知能と認知科学の複合領域の研究を推進するプロジェクトが最近米国を中心に盛んになっている。一方、日本では、脳研究が進められてきており、その中で認知科学の成果も一部出てきている。しかし、日本のプロジェクトは基礎研究が中心で、人工知能などの応用への展開は米国に比べ遅くれている。

以下に、人工知能と認知科学の最近の研究動向を述べ、ITのハードウェアの急速な進展に比較し、進展が遅く見えるこの“知的コンピューティング”研究を促進するための方策を探る。本稿での人工知能研究は、広義に捉え、コンピュータにて知的処理を実現する研究全般を含んでいる。

2. 人工知能の研究動向

2-1

人工知能の歩み

人工知能研究は、1950年代後半に「コンピュータ上に知能を創る」ことを目標に開始されている。数学・心理学・哲学の研究者がコン

ピュータを使って人間の知的活動を表現しようとしたのが始まりである。1970年代には、専門家（エキスパート）の知識をルールとしてコンピュータ上に記述し、推論処理により専門家なしでも問題解決ができることを示した。簡単な医療診断や製造工程故障診断のた

めのエキスパートシステムが作られ実用化された。しかし、知識ルールの前提条件を完全に記述しようとするれば、その条件は無限に増大してしまうという問題（フレーム問題）が指摘され、ルールベースのエキスパートシステムは人間の専門家並みの性能を得るまでに

図表 1 人工知能研究の歴史上のトピックス

			コンピュータの歴史 (参考)	
			1947 年	ENIAC コンピュータ
1950 年代後半～60 年代 [人工知能研究の始まり]	1956 年	“Artificial Intelligence (人工知能)” の提唱 (J.McCarthy)	1951 年	UNIVAC・I 商用コンピュータ
	1965 年	人間と会話するコンピュータプログラム Eliza の開発	1964 年	IBM360 メインフレーム コンピュータ
	1967 年	知識ベースのチェスプログラム MacHack を制作		
1970 年代 [エキスパートシステム (知識の工学的表現)]	1974 年	エキスパートシステム MYCIN(医療診断)	1972 年	i4004 マイクロプロセッサ
	1974 年	プランニング生成プログラム ABSTRIPS	1976 年	パソコン Apple
	1970 年代半ば	グラフィカル・ユーザーインターフェース		
1980 年代後半 [ニューラルネットワークの隆盛]	1982 年	Hopfield ニューラルネット計算特性	1981 年	パソコン IBM PC
	1986 年	日本人工知能学会の設立		
1990 年代 [エージェント (分散処理の試み)]	1990 年	遺伝的プログラミングの開始	1991 年	Windows3.1
	1995 年	状況依存エージェント (Russell)	1993 年	Web ブラウザ Mosaic
	1995 年	知識発見とデータマイニング国際会議始まる	1993 年	クライアント・サーバーモデル
1990 年代後半～ [データマイニング (機械学習の再来)]	1997 年	チェスプログラム DeepBlue がチェスチャンピオンに勝利		
	1999 年	セマンティック Web 提唱		
	1999 年	ペットロボットの出現		

至っていない。1980 年代には、それまでの記号・シンボル処理の研究からニューラルネットワークを代表とするデータ処理の研究に活路を見出そうとした。このニューラルネットワーク研究はその後、脳の神経網の機能研究につながっている。1990 年代には、コンピュータネットワーク上を自走し簡単な機能を実行するエージェントの研究が盛んになった。この研究は、コンピュータが人間の代用機能を果たす擬人化エージェントや個人の要望に沿って情報収集する個人化エージェント (パーソナリゼーション) として発展している。さ

らに、社会の中の個人の挙動を 1 つのエージェントに実行させ、多数のエージェントをネットワーク上で動作させることで、社会や経済システムをシミュレートする研究も行われている。

コンピュータのデータ処理能力は、人間を遥かに超えている。従って、人工知能の研究の目標も、コンピュータ上に知能を創ることによる「人間の代用としての人工知能の実現」ではなく、単純かつ膨大なデータ処理や巨大なデータから意味あるデータを抽出するなど人間には不得意な処理をコンピュータに任せ、人間本来の知的活動の生産

性を向上させる「知的活動の支援」が目標となってきている。

2 - 2

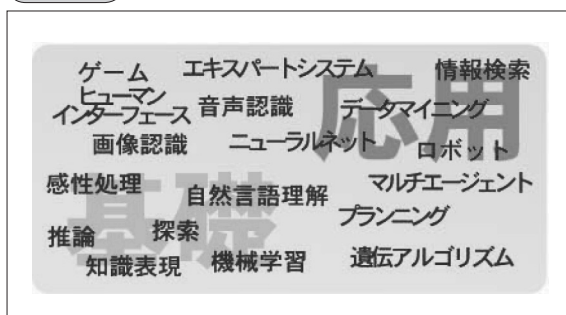
最近の人工知能研究の成果

人工知能研究のテーマは、図表 2 に示すように多岐にわたっているが、最近の研究の動向として推論・思考としてのゲーム、エージェント、データマイニング、視覚・聴覚、ロボットの研究成果を述べる。

(1) ゲーム

推論・思考の人工知能研究として、チェッカー、チェス、オセロ、将棋などのゲームにおいて人間に勝てるコンピュータソフトウェアを作ろうとするゲーム研究がある。米国では 1970 年代に国際コンピュータチェス協会が組織され、コンピュータチェス選手権が開催された。1994 年にはチェッカーで、1997 年にはオセロとチェスで、コンピュータはワールドチャンピオンを負かした。将棋では、アマチュア 5 段のレベルに達して

図表 2 人工知能研究の研究テーマ



情報源：人工知能学会ホームページより

いられる。

これらのゲーム・ソフトウェアは、大量の定石と名人の打った手を知識データベースとして持ち、あらかじめ決められた戦略を用いて推論し、次の一手を計算する。すなわち、膨大なデータと高速処理を武器にさらに推論を加えることによって、コンピュータは比較的簡単なゲームでは人間に勝ったのである。今後は、名人の戦略を解明して、より複雑なゲームである将棋や碁での挑戦が続く。

(2) エージェント

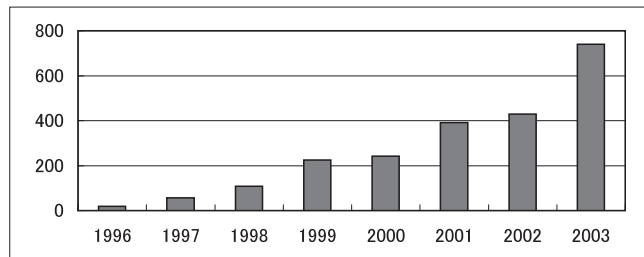
人間のアシスタントとしてネットワーク内のサイトを廻り自律的に行動をする「エージェント研究」が1990年代から盛んになった。エージェントはコミュニケーション能力と簡単な処理機能を持ち、ネットワーク内を自走してある目的の処理を実施する。パーソナリゼーション、擬人化エージェントの研究が行われ、スケジューラー、Webナビゲーターに応用されている。

さらに、多数のエージェントをネットワーク上で自律的に行動させる「マルチエージェント研究」があり、その応用としては社会システム、経済システムのシミュレーションがある。社会や経済活動の個別要素をエージェントとして記述し、社会や経済全体をネットワークとして記述して、エージェントをネットワーク上で動作させてその挙動を解析する。エージェントの記述が実際の社会や経済の個別要素を表現できているか、個々のエージェントの相互作用が記述できているかなど困難で未解決な課題が多くある。

(3) データマイニング

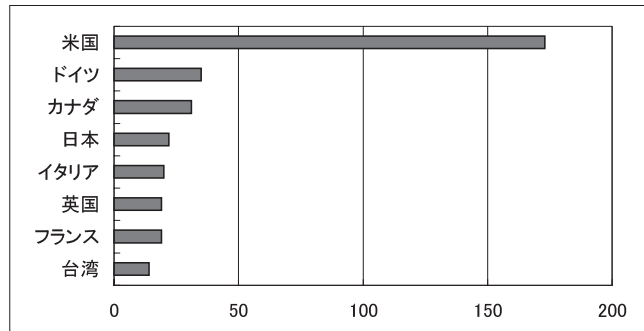
データマイニングとは、大量のデータから意味のある情報を見つける技術であり、1990年代後半から盛んになってきた。データマ

図表3 データマイニング論文数推移



ISIDB から Data Mining を検索

図表4 データマイニング国別論文数（2002 年分）



ISIDB から Data Mining を検索

イニングには古くから研究されてきた機械学習のアルゴリズムが使われ、応用分野に応じて改良や新しいアルゴリズムが提案されている。データマイニング技術は、文書解析、情報検索、セキュリティなど多くの応用が進展している。

従来、コンピュータのセキュリティを守るウィルス検出や不正侵入検知の方法では、事前に登録したウィルスパターンや不正侵入元をチェックしている。しかし、この方法では、事前に登録されていないパターンに対しては検出ができない。新ウィルスの出現とパターン登録更新との時間差があるところで被害が発生している。これに対応できる学習法が研究され、変動するデータに追従するパターンを適応的に求めることで、新ウィルスの検出性能を向上している。また、この学習手法は、ネットワーク不正侵入・攻撃の検出、コンピュータ異常動作検知などでも威力を発揮している¹⁾。

データマイニング技術と自然言語処理技術とが結びついたテキストマイニングの研究も盛んである。この研究では、アンケート文

の分類、評判分析、メールの自動分類、購買履歴の分類などが行われ、マーケティングのツールとして利用されている。

このようなデータマイニング研究は、図表3、4に見るように、1990年代後半から盛んになり、米国が強い。そのきっかけの1つに、米国の数理学者 V.Vapnik が1995年に提案した識別手法であるサポート・ベクター・マシンがある。この識別手法は、未学習データに対しても識別能力が高く機械学習の一つの手法として現在多用されている。1997年から米国ではデータマイニングコンテストが開かれ、理論をいち早く応用へ展開させる努力をしている。日本では米国に3年遅れて2000年に人工知能学会によって「共通データからの知識発見」コンテストが行われている。さらに、米国では、基礎研究を推進している NSF も学習の基礎理論から実証研究まで統合研究する拠点 Science of Learning Center (図表7) を計画しており、応用への出口を意識した基礎研究を推進している。

(4) 視覚・聴覚

文字認識、音声認識、物体認識などは、条件の揃った環境では実用化されている。しかし、利用場面を広げようとする、情報そのものが曖昧で前後の状況から判断しなければならなかったり、周りの音が入り込んだり、照明条件が変わるなど利用状況の変化がある。実用化されている手法は、主に大量のデータを用いた統計的な手法である。環境・状況の変化に対するすべてのデータを集めることは不可能であり、性能に限界がある。複数の情報から判断するマルチモーダル研究や状況変化に適応できる方式の研究が求められている。

(5) ロボット

最近盛んになっているロボットの研究では、ロボットに視聴覚機能を持たせる研究が行われている。ここでは、認識機能の前段階

で、認識のための情報をどのように環境の中から切り出してくるかが課題となる。環境の中から人間の声または目的の物体を抽出しそれを追従することなど、新しい多くのテーマがある。

また、二足歩行のロボットや介護ロボットの研究が盛んになるにつれて、人間とロボットとの対話、生活環境での行動が求められるようになってきた。ロボットが人間と自然にコミュニケーションをとるために、表情、ジェスチャなどの非言語的な手段を持たせる研究も開始されている。現在のロボットの頭脳は未熟であり、人工知能研究の大きな進展に期待が寄せられている。

2 - 3

人工知能研究の今後の課題

人工知能研究の成果は、エキスパートシステム、文字認識、音声

認識、機械翻訳、データマイニング、情報検索などで実用化されているものも多くある。また、パーソナライゼーション、分散エージェントなど人工知能研究の成果が、情報システムのソフトウェアの一部に組み込まれ、外見上は人工知能とは見えない形で利用されているものも数多くある。

しかし、実用化された手法にもその発展に限界もある。例えば、データベースに依存する統計的手法では、取得したデータと同様な状況ではその性能を発揮するが、利用状況の変化に対して頑健ではない。現在の人工知能は、人間のように多様な情報から判断する能力は持っておらず、人間の能力に近づこうと研究が継続されている。ゲームの研究で見たように、大量のデータのみで攻める機械的アプローチには限界があり、人間の戦略を取り入れた、人間に学ぶアプローチとの融合が重要である。

3. 認知科学の研究動向

前章で説明した人工知能研究では、人間に学ぶアプローチとして認知科学の知見が利用されてきている。また、数理的機械的アプローチにも性能向上の限界があり、認知科学がその限界を打破する新しいアイデアを提供するとの期待が高い。以下に認知科学の動向と“知的コンピューティング”に向けた認知科学研究の課題を述べる。

3 - 1

認知科学の歩み

認知科学は、人間の認知メカニズムを解明しようとする研究で、認知心理学とコンピュータが結びついて 1970 年代に始まった。心理学、情報科学、神経科学、言語学、文化人類学の研究者が集まった。認知心理学は、1950 年代に心理学の中で、知的行動を心的状態

モデルから機能的に説明する研究として盛んになった研究分野である。1980 年代には、脳の非侵襲計測技術が進展し、さらに 1990 年代には観測データの可視化技術が進み、脳活動の観測データが数多く得られるようになった。この技術を用いて、認知活動が脳内のどの部位で行われどのような関係にあるか研究され、脳内マッピング研究が盛んになった。この研究は認知神経科学 (Cognitive Neuroscience) とも呼ばれている。これまでに、脳の可塑性、脳内部位間の双方向結合性などが判明してきている。また、人工知能研究で使われたニューラルネットワークの方法論を、脳神経回路網のシミュレーションに使用して、脳の情報処理モデルを推定しようとする研究も盛んである。

一方、1980 年代後半に、認知心

理学を工学へ応用しようと認知工学 (Cognitive Engineering) が提唱された。工学的装置の設計にユーザーのニーズの視点が欠けていたため、インターフェース、コミュニケーション、インタラクションなど人とモノ (装置) の相互作用の研究が進められた。インターフェースの存在を意識せずスムーズに使用できるインターフェースの実現を目指した。

3 - 2

最近の認知科学研究の成果

認知科学の研究テーマは、図表 6 に示すように多岐にわたっている。中枢系は、人間の心の高度な働きのメカニズムを解明しようとする研究である。脳の活動を観測できるようになったとは言え、まだ個々の認知機能の断片的な活動

しか分かっていない。言語系では、言語の理解、言語の生成、コミュニケーションなどの研究がある。感覚系である視覚などでは、外部刺激がどのように脳内の活動につながるかを脳内活動の観察や心理学実験などから解明する研究が進んでいる。行動系では心理学実験を中心に外部に現れる行動を観測し認知行動を推定する。中枢系、感覚系での脳活動観測に比較して、行動の外部観察が比較的容易でデータも多い。

(1)視覚・聴覚・運動の相互作用

物を認識する視覚認知機能の研究では脳の視覚野の活動だけでなく、運動野も連動して活動することが観測されている。このことから、人間が物を認識する過程では、身体の記憶情報を利用していることが判明してきており、最近では、「身体化による認知」として研究が推進されている。この視覚と運動の相互作用は、現在のコンピュータにおけるパターン認識メカニズムにはない。視覚情報のみならず、聴覚情報、身体情報など複数の情報を利用したマルチモーダルな認識方法への示唆を与えている。今後更なる相互作用のメカニズムの解明が望まれる。

(2)認知特性の機器への応用

情報機器のヒューマンインターフェースの設計では、ユーザーの行動を観測してその結果を反映させてきた。また、情報機器が普及するにしたがって、誰もがアクセスできるようにするユニバーサルデザインの考え方も広がってきた。しかし、経済性が先に立ち、人間の認知特性を取り入れた設計が十分されているとは限らない。例えば、アクセスビリティを確保するため、音声ガイダンスがつけられている情報機器があるが、この音声ユーザーに対して不愉快さを与え、エラーを引き起こすこ

図表5 認知科学研究の歴史上のトピックス

1950年代後半 心理学における認知革命	1956年	短期記憶構造 (Miller)
	1956年	概念形成における認知過程 (Brunner)
	1957年	言語文法理論 (Chomsky)
	1958年	認知フィルター (Broadbent)
1970年代 認知科学の出現	1972年	問題解決理論 (Newell&Simon)
	1979年	米国認知科学学会の設立
	1980年	認知科学の12の主題 (Norman)
1980年代 非侵襲脳計測技術の発展	1983年	日本認知科学会の設立
	1986年	心の社会 (Minsky)
	1986年	認知工学の提唱 (Norman)
1990年代 認知神経科学の進展	1995年	神経の可塑性を考慮した神経回路網モデル
	1996年	イメージ生成における神経の双方向作用
	1990年代後半	コンピュータグラフィックスによる脳活動イメージングの進展

ともある。使用状況や個別ユーザーに適応する柔軟なシステムが必要であり、認知科学者と情報機器技術者の共同研究が進展することが求められている。

また、TV会議システムは、情報機器技術者が先端技術を駆使したシステムとして作られているが、使い勝手の評価がされていない製品が多い。臨場感が乏しいと感じる原因は、通話者同士が限られた空間情報しか共有できない点にあることが認知科学研究²⁾から指摘されている。視線やジェスチャが小さな画面や1つの画面では有効に働かないためである。この知見は、TV会議のみならず、遠隔操作システムの使いやすい設計に応用できる。

一方、自動車において、安全な操作性は重要であり、人間の認知特性を考慮した設計が検討されてきた。例えば、視覚における「注意」という認知メカニズムが、認知心理実験により研究され、注意の深さと広さの相反関係や、視覚の遠近の切り替え特性が判明している³⁾。注意の深さと広さの関係は、自動車の安全運転の指針となっている。さらに、視覚特性は、近から遠の方が遠から近への切り替えより遅いことか

図表6 認知科学の研究テーマ

中枢系	思考、学習、概念、記憶
言語系	言語、コミュニケーション
感覚系	視覚、アフォーダンス (環境と認知)
行動系	行動、相互作用

ら、カーナビの使い方によっては危険性があることが指摘されている。情報機器設計においても、使用環境に応じた安全性設計が求められている。

(3)認知特性を反映させたデザイン

建築、自動車などの分野ではデザイナーが重要な役割を担っているように、情報機器でもデザイナーが必要となってきた。これは、数多くの情報機器が生活の中に入り込み多用するようになり、それを快適に使用する要求が高くなったためである。例えば、Web上に情報を配置するデザインでは、見栄えのみならず、ユーザー動作の機能性、インターラクティブ性など認知科学的知見を取り入れたデザインが必要である⁴⁾。

情報機器のデザイン過程には、ユーザーニーズの選定、デザイン仕様、使いやすさのテスト・評価が必要であり、これら全体を管理するのが情報機器デザイナーの役割である。現在の情報機器は、見

栄えはよくても使い勝手が悪かったり、個々の要素は魅力的であっても全体としてのデザインがなくちぐはぐな製品が多い。情報機器のデザイン、特にインターフェース・デザイン分野は、心理学、認知科学、人間工学、ソフトウェア工学、プロダクトデザイン、グラフィックデザインが関連する複合領域であり、これらの総合化が求められている。

3 - 3

認知科学研究の今後の課題

認知科学を“知的コンピューティング”へ応用する側面から見ると、認知科学研究で得られた知見は一部利用されて始めているが、

まだ不十分である。

行動系認知機能として、人間の行動・認知メカニズムの研究で得られた知見は、一部情報機器のヒューマンインターフェース・デザインに反映されている。しかし、その設計は、経験の積み上げに頼っており、今後は認知科学において汎用性のある成果が出て、認知特性のさらなる体系化が進むことが望まれる。その実現のためには、認知科学研究者と情報技術研究者の交流・連携・共同研究を進める中で、情報機器設計に必要な認知特性の本質を解き明かすことが必要である。

また、中枢系認知機能や感覚系認知機能のメカニズムはミクロ

的、断片的にしか分かってきていない。従来、この分野は、基礎研究として進められ、応用は積極的ではなかった。しかし、“知的コンピューティング”研究には、数理的機械的処理の限界を超える、新しいアイデアの導入が期待されている。認知科学研究には、その成果が“知的コンピューティング”研究に使えるように、応用への出口を意識した研究が望まれる。それとともに、“知的コンピューティング”研究において、認知科学研究の成果を試用し、その可能性と問題点を認知科学にフィードバックする、両分野間の交流・連携・共同研究が必要である。

4. “知的コンピューティング”研究の課題

人間の知的活動を支援する能力と人間との自然なインターフェースを持つ“知的コンピューティング”を創ろうとする研究には、認知科学の進展を人工知能研究に

反映させる必要があり、各国とも認知科学と人工知能との複合領域の研究のプロジェクトを推進させている。米国では図表 7、8 に示すように、NSF（国立科学財

団）と DARPA（国防高等研究計画局）が積極的にプロジェクトを進めている。NSF は基礎的研究に広く研究資金を提供し支援をしており、その研究テーマ数も多いが、共同研究や複合領域の研究を推奨している。さらに、最近では、基礎研究から応用研究までを統合する研究拠点形成にも力を入れ始めている。一方、DARPA では、基礎的研究であってもシステム開発やデモンストレーションを求めており、成果の出口を明確にしている。個々のプロジェクトの規模は比較的大きく、プログラムマネージャーが管理し、最終成果も厳しく問われる。例えば、Cognitive Information Processing Technology の中のあるプロジェクトでは、20 の異なる組織からメンバーが集まっており地理的には分散しているが、プロジェクトリーダーの下で 1 つの仮想的な研究所のように運営されている。

欧州では、EC の第 6 フレームワーク・プログラムの中で Cognitive Systems として取り上

図表 7 NSF の認知科学・人工知能関連プロジェクトの例

時期	プロジェクト名	内容
2001 年～	Cognitive Neuroscience	認知神経科学
2003 年～	Collaborative Research in Computational Neuroscience	計算論的神経科学の共同研究
2003 年～	Artificial Intelligence and Cognitive Science	人工知能と認知科学の複合領域研究
2003 年～	Human-Computer Interaction	ヒューマン・マシン・インターフェースの研究
2003 年～	Human Language and Communication	自然言語とコミュニケーションの新しい計算モデルの研究
2004 年～	Science of Learning Center	機械学習、教育・心理学からの学習、生理学からの学習の研究拠点

図表 8 DARPA の認知コンピューティング関連プロジェクトの例

時期	プロジェクト名	内容
2001 年～	Augmented Cognition	ストレス環境下での人間の認知能力を拡大するシステムの開発
2003 年～	Cognitive Information Processing Technology	人間活動を認知し支援するシステムの開発
2003 年～	Real-World Reasoning	実用的な自動推論エンジンの開発
2003 年～	Architectures for Cognitive Information Processing	認知コンピューティングに適したアーキテクチャの開発

げられている。また、英国、ドイツでは、技術予測のテーマとして認知科学が取り上げられ、具体的な推進計画への検討が始まっている。昨年11月に出された英国貿易産業省科学技術局（DTI OST）による技術予測報告⁵⁾では、認知科学は興味深い芽がでつつあり、人工知能研究と協力し合うことにより、情報通信分野やライフサイエンス分野の応用へつながる成果が期待でき、広く社会に貢献できるであろうとしている。

日本でも図表9に示すように、複合領域研究プロジェクトが実施されている。これらのプロジェクトでは多くの研究者が参加しその研究テーマ数も大きい。研究領域間の相互交流は進むが、プロジェクトが終了すると研究チームは解散してしまい、新組織形成にまで発展するものは少ない。2002年度から世界最高水準の研究教育拠点を形成することを目的に21世紀COEプログラムが実施されており、認知科学関連で図表10に示す6つのプロジェクトが選定されている。これらのプロジェクトの目的には、複合領域の研究の推進だけでなく、創造的な人材育成がある。プロジェクトによって研究

図表9 日本の競争的資金による認知科学関連プロジェクトの例

時期		プロジェクト名	内容
1997年～2003年	戦略的創造研究推進事業	「脳を創る」「脳を知る」の一部	脳型デバイス・アーキテクチャ、認知処理システム、脳の高次機能の機構の解明
1997年度～2000年度	特定領域研究	心の発達：認知的成長の機構	概念の発達、言語の発達、認知発達の障害
2001年度～2005年度	特定領域研究	ITの深化の基盤を拓く情報学研究：A03人間の情報処理の理解とその応用に関する研究	知覚と行動の動的相互作用の解明と統合システムの実現、マルチモーダルなマン・マシン・インタラクション
2002年度～2006年度	萌芽・融合開発プログラム	動的インタラクションによるコミュニケーションの創発機構の構成と解明	動作・表情の認知の神経機構、コミュニケーションモデル、神経回路の自己組織化原理

者が育成され、プロジェクト終了後研究がさらに発展し体系化され、将来的には新組織として研究チームが存続していくことが期待される。また、日本では、脳研究のプロジェクトも理化学研究所脳科学総合研究センターを中心に推進されている。この研究の中に一部、認知科学研究も含まれているが、脳を中心とした基礎的な研究である。

しかし、米国では、認知科学と人工知能の複合領域の研究から応用へつながる成果が期待できるとして、基礎研究の推進とともにその応用への出口をも求めている。このようなプロジェクトが終了した後は、産学連携により実用化への動きが加速される。一方、日

本のプロジェクトは基礎研究の推進が中心であり、基礎研究としてよい芽が得られているが、それがなかなか大きく発展していかない。終了したプロジェクトの研究資産を次のプロジェクトへ旨く継承できるような運営が必要であろう。基礎研究でも応用への出口を意識して次に来るべき産学協同研究へ発展させる努力も必要であろう。産業界もよい芽を実用化させるため、共同研究の提案など積極的に大学に働きかけることも必要である。情報通信分野の研究速度は非常に速く、基礎研究でよい結果が得られるとすぐそれを応用へむすびつける動きが世界中で起きている。

図表10 認知科学関連21世紀COEプログラム拠点の例

COE 名称	大学	学科	専攻または学問領域
言語・認知総合科学戦略研究教育拠点	東北大学	国際文化研究科、未来科学技術共同研究センター、情報科学研究科、医学系研究科、医学部附属病院、工学研究科、文学研究科	認知言語学、認知心理学、脳機能イメージング学、自然言語処理学、言語学、生成文法、音声言語情報処理学、音声学、音韻論、神経心理学、神経内科学、社会言語学、言語地理学、学習心理学、言語人類学、計算言語学
心とことば—進化認知科学的展開	東京大学	総合文化研究科、理学系研究科、人文社会系研究科、農学生命科学研究科、医学部附属病院、総合研究博物館、情報基盤センター	人間進化学、心理言語学、統合言語科学、計算言語科学、認知発達臨床科学
心の解明に向けての統合的方法論構築	慶應義塾大学	文学研究科、社会学研究科、言語文化研究所	哲学・倫理学専攻、美学美術史学専攻、史学専攻、国文学専攻、中国文学専攻、英米文学専攻、独文学専攻、仏文学専攻、図書館・情報学専攻、心理学専攻、教育学専攻、言語文化研究所
全人的人間科学プログラム（脳の学習・記憶・推論・思考のメカニズムの究明とその教育技術への応用）	玉川大学	学術研究所、工学研究科、農学研究科、文学研究科	脳科学研究施設、言語情報文化研究施設
こころを解明する感性科学の推進	筑波大学	人間総合科学研究科	システム脳科学、神経分子機能学、行動神経科学、心理学、精神機能障害学、脳型情報処理機構学、感性情報学、芸術学
生物とロボットが織りなす脳情報工学の世界	九州工業大学	生命体工学研究科	神経生理学、電気化学、心理学、人類動態学、数理科学、言語科学、デバイス、ロボティクス

5. おわりに

人間の知的活動を支援する能力と、人間との自然なインターフェースを持つ“知的コンピューティング”に向けた研究は、人工知能分野で進められてきた。その知的処理の性能は、コンピュータの処理性能が向上するとともに実現される性能を向上させ、人工知能としては見えにくい形であるが断片的に多くの情報システムに組み込まれ実用化されている。しかし、コンピュータの処理性能にのみに依存する数理的機械的アプローチでは、知的処理能力の向上には限界が見える。

一方、人間の認知機能メカニズムの解明する認知科学研究では、1990年代から脳の非侵襲観測技術の進歩により、認知機能と脳内活動とのマッピング研究が大きく進展し、認知活動における視覚・聴覚・運動などの相互作用が一部解明されてきた。思考・推論など中枢系の認知機能のメカニズムはまだ断片的にしか解明されていないが、数理的機械的アプローチの限界を乗り越える新しいアイデア提供への期待が高い。

従来、認知科学の研究は、基礎研究として成果を出す、その応用への展開には積極的ではなかった。情報通信技術者は、認知科学の知見を利用するのみで、相互の連携は少なかった。しかし、情報通信における課題を認知科学研究へ持ち込み認知科学の立場から解明する努力により、新しい展開が拓ける。また、この研究は複合領域であり、かつ、応用への出口へ

道をつける研究でもある。そのためには、単なる複合領域研究プロジェクトでは、プロジェクト終了後成果が分散し蓄積できず、クリティカルマスに達せず、その進展スピードも遅い。認知科学と人工知能の複合領域で、ある程度の数の研究者を集め、基礎研究から応用研究までを狙った研究拠点も必要であろう。

最近米国では、認知科学と人工知能の複合領域の研究を推進させるプロジェクトを積極的に進めている。応用への出口を意識した基礎研究とそれをフォローする応用研究が積極的に進められ、そのための研究拠点計画も進められている。この分野では先頭を走っている。情報通信分野の研究速度は非常に速く、基礎研究のよい結果をすぐ応用へ結び付ける動きが起こっている。

日本にも優れた基礎研究の芽はあるが、それがなかなか大きく育たず応用へも結びつきにくい状況にある。複合領域の研究もプロジェクトが終了すると研究チームは解散し、その後大きく発展して行きにくい。出てきた芽を大きく育てられるように、研究拠点を作るプログラムの検討や、大学では、研究組織のスクラップ・アンド・ビルドをも含む柔軟な運営が望まれる。また、基礎研究を応用研究に結びつける努力も少ない。基礎と応用の交流のインセンティブを増やし、応用の出口を意識した基礎研究を推進することと、また、産業界もよい芽を実用化させるため共同研究の提案

など積極的に大学に働きかけることが必要である。

謝 辞

本稿をまとめるに当たり、東京大学先端科学技術研究センター中小路久美代教授、法政大学社会学部原田悦子教授、大阪大学人間科学研究科三浦利章教授、京都大学情報学研究科松山隆司教授、乾俊郎教授、東京大学情報理工学系研究科國吉康夫助教授、産業総合技術研究所橋田浩一サイバーアシスト研究センター長、NEC インターネットシステム研究所山西健司主席研究員のご意見を参考にさせて頂きました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) K.Yamanishi, J.Takeuchi, G.Williams, and P. Milne: "On-line Unsupervised Outliner detection using finite mixtures with discounting learning algorithms," KDD2000, ACM, (2000 年 8 月)
- 2) 原田悦子他、“「使いやすさ」の認知科学”、共立出版、(2003 年 7 月)
- 3) 三浦利章、“注意の限界を以下に捉えるか”、法と心理、(2001 年 10 月)
- 4) 中小路久美代、“デザイン再考”、ヒューマンインターフェース学会誌、Vol.5, No.3, (2003 年 8 月)
- 5) Foresight Cognitive Systems Project, DTI, OST, UK (2003 年 11 月)

特集④

米国の科学技術政策動向
— AAAS 科学技術政策年次フォーラム速報 —

総括ユニット 伊神 正貫

1. はじめに

2004 年 4 月 22 日、23 日 に AAAS (American Association for the Advancement of Science) の科学技術政策年次フォーラムが開催された。年次フォーラムは 1976 年以来毎年春にワシントン DC において開催されている政策討論の場であり本年が 29 回目の開催となる。

年次フォーラムのテーマは、その時点において米国の科学技術コミュニティが直面している予算およびその他の政策問題から選ばれる。開催時期は、政府の

翌年度予算案が公表された後、議会審議が本格化する時期にあたり、政府の予算案に対する関係者の批判や支持の表明、政府関係者による政策の説明、さらに関係者間の討論を行うのに適した時期に設定されている。

今年は、ジョン・H・マバーガー大統領科学補佐官をはじめとする政府高官、トム・ダシュル民主党上院院内総務などの議会関係者、大学の研究担当幹部、関連シンクタンクのアナリスト、学会団体ロビーイング担当スタッフ、さ

らには諸外国の科学技術政策の関係者など計 500 名以上が参加し、

- 2005 年度の連邦政府研究開発 (R&D) 予算の見通し
- テロ以降の安全保障政策とその米国科学への影響
- 情報化、グローバリゼーション下における米国の競争力

などについて議論が行われた。本稿では年次フォーラムの主なトピックを概観する¹⁾。

2. 2005 年度の連邦政府 R&D 予算

2004 年 2 月 2 日にリリースされた、ブッシュ政権の 2005 年度の予算教書における連邦政府予算要求は 2 兆 4,000 億ドル、そのうち連邦政府 R&D 予算は 1,320 億ドルとなっている。この内訳を見ると 57% (約 750 億ドル) が防衛関連 R&D 予算であり、残りの 43% (約 570 億ドル) が非防衛関連 R&D 予算となっている。前年度との比較では、防衛関連、非防衛関連 R&D 予算とも増となっているが、防衛関連予算の伸びが大きい (全体は 4.3%、防衛関連は 5.9%、非防衛関連は 2.3%のそれぞれ増)。

図表 1 に、2005 年度における各省庁の R&D 予算要求額を 2004 年度と比較した結果を示す。国土安

全保障関連の予算については、ブッシュ政権において明確な伸びを見せている。特に、国土安全保障省 (Department of Homeland Security) の R&D 予算は 12 億ドルであり、これは前年度との比較で約 15%の増加である。一方、国防総省 (Department of Defense) では増加分のほとんどがミサイル防衛システムなどの開発へ振り向けられ、基礎研究、応用研究などの科学技術に関する予算が大幅減となっている。ブッシュ政権のプライオリティが①国防、②国土安全保障、③経済の 3 点である事を反映して、連邦政府 R&D 予算も上記 3 点にプライオリティを置いているとしているが、予算増を享受しているのは主に国防、国土安

全保障関連予算である。

AAAS R&D Budget and Policy Program ディレクターのケイ・コイズミ氏は、ブッシュ政権が提示している財政赤字の削減プラン (財政赤字を、今後 5 年間で 2004 年度の半分まで削減するプラン) に従い、連邦政府 R&D 予算が推移した場合の 2006 年以降の見通しを以下のように述べた。

- 国土安全保障省など防衛関連 R&D 予算については、引き続き増加
- NASA を除いた非防衛関連 R&D 予算については、2004 年度との比較で 5 ~ 15%の削減

NASA の予算増加は、ブッシュ

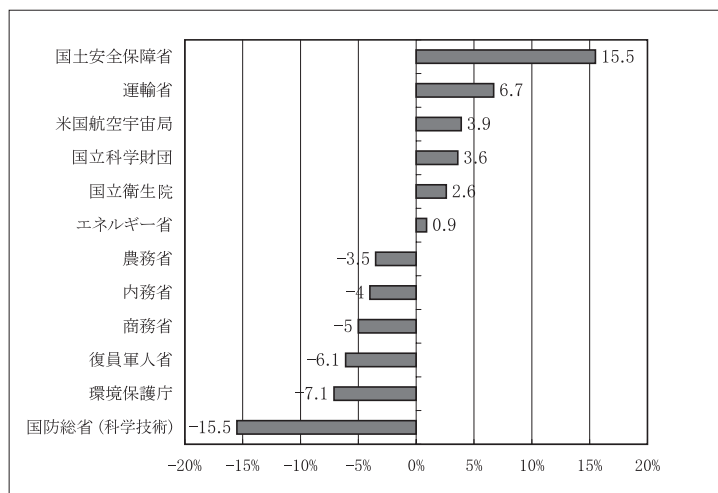
大統領が今年 1 月に示した新宇宙戦略（新しい宇宙往還機の開発計画に加え、有人の月探査計画、その先の将来探査構想などからなる）の実施によるものである。

ブッシュ政権の科学技術政策については評価が分かれている。マーバーガー補佐官は基調講演で、現政権下では国土安全保障のみでなく、長期的な経済発展を目指した非防衛関連の R&D 予算も持続的な伸びを見せていることや、政府と科学者コミュニティの連携の成果として、米国保健福祉省の中に、新たにバイオセキュリティを専門に扱う諮問委員会が設立された事などを強調した。一方、ダシユル院内総務の講演では、政府は科学者が研究を自由に行い、必要なリソースを確保できるようにする義務があるにもかかわらず、現政権

はそれを怠っており、かつ、ヒト胚研究に積極的という理由で大統領生命倫理委員会の 2 名の委員を解任したと主張し、現政権は、自

らにとって都合の良い結果を得るため、科学的分析を圧迫し捻じ曲げていると批判した。

図表 1 2005 年度における各省庁の R&D 予算要求額と 2004 年度の比較



年次フォーラムの発表資料 [Kei Koizumi, AAAS, "The Federal Investment in R&D in FY 2005 and Beyond"] をもとに科学技術動向研究センターにおいて作成

3. テロ以降の安全保障政策とその米国科学への影響

テロ以降の安全保障政策が、米国の科学に及ぼした影響について、バイオセキュリティやビザ問題を主として議論が行われた。

2001 年におきた炭疽菌によるテロ事件をきっかけに、保健衛生の向上のために開発された生物操作の技術や新しい発見が悪用されることで、安全保障に脅威をもたらす可能性があるとの認識が生じた。この懸念に伴い、2002 年に「公衆の健康安全保障ならびにバイオテロへの準備および対策法 (Public Health Security and Bioterrorism Preparedness and Response Act of 2002)」が成立した。この法律では、特定の病原菌や毒素を扱う機関の登録や扱う者の身元確認を求めている。

また、本年度になって米国保健

福祉省の中に、新たにバイオセキュリティを専門に扱う諮問委員会が設立された。「National Science Advisory Board for Biosecurity」では、今後バイオ研究がテロなどに悪用されることがないように指針を作成し、各政府・研究機関などに助言や指導を行っていくとの事であった。

また、安全保障政策が弊害となっている具体的な事例として、米国籍以外の研究者の助成金や契約への参加が制限されたり、成果の公表が制限されたりするケースが増えている事、ビザ問題が留学生や海外からの奨学生の意欲を低下させており、マサチューセッツ工科大学では博士課程に進学する学生数が 2003 年以降減少している事などが紹介された。

これらの結果として、

- 非米国籍研究者に対する過剰な制限による研究者の流出
- 政府による共同研究の管理の強化による海外の共同研究者との関係への影響
- 優秀な留学生や奨学生の確保が困難になることによる科学技術の生産性と米国のリーダーシップへの影響

などが懸念されており、今後どのような対策を取るかが課題とされた。

2001 年のテロ以降、安全保障の問題が米国の科学に大きな影を落としている様子が垣間見られた。

4. 情報化、グローバル化下における米国の競争力 —中国の台頭—

情報化、グローバル化が進む中で、技術開発のインド、中国などへのアウトソーシングが進んでいるとの認識が示された。アウトソーシングによるインパクトとしては、短期的には情報技術者の失業率の増加とそれに伴う競争力の低下、賃金引き下げなどが挙げられる。米国の若者世代はこの傾向を察知しており、コンピュータサイエンスの学士入学者が減っているというCRA (Computing Research Association) の調査も紹介されていた。また、これに伴う長期的な影響として職業構造の変化、軍事的優位性や国土安全保障に対する影響などが提起されていた。

また、経済競争の相手は、過去には日本であったが、現在は中国との認識が大半であった。特に、中国の経済成長の背景には、日本とは異なる技術開発モデルがあると

の指摘があった(日本:高価格、高賃金、先端技術、産業政策など。中国:低価格、低賃金、先端技術、活発な起業家精神など)。

中国はこれまでの低コストの製造能力を基盤として経済を成長させてきたが、今ではイノベーション能力を急成長させつつあり、その背景として、海外在住中国人科学者、留学生などを通して海外の研究活動に対するアクセスを拡大しつつあることが中国の特徴として挙げられていた。また、米国のビザ問題は、呼び戻し政策とも連動して、結果として中国に優秀な中国人を帰し、中国の産業強化に貢献するだろうとの指摘もあった。

また、ジョージア工科大学のダイアナ・ヒックス教授からは、中国の台頭を示すさまざまなデータが示された。それによると、1991年～2001年の間のGERD(国の総研究開発費、Gross national

Expenditures on Research and Development)の増加率を見ると中国、シンガポールが急増しており、1995年との比較で2.5～3倍となっている。2001年の段階で中国のGERDは570億ドルであり、これは日本の約半分となっている。また、1986～1999年の間の中国人の博士号取得者数をみると、1999年には1986年の54倍と驚異的な伸びを見せ、絶対数も1998年には日本と同レベル(約6500名)になっている。また、同期間に出版された論文数をみても、中国は1999年には1986年の約4倍となっている。

ヒックス教授が例示したデータの多くでは、絶対量は米国、日本がまだ優位性を保っているが、他方で中国がその存在感を急激に増しつつある。

5. 新たな研究開発の方向性 —認知科学—

新たな研究開発の方向性として「心に関する研究」あるいは「認知科学」が浮上しつつあるように感じられた。

ダシユル院内総務からも、ヒューマンゲノムプロジェクトに続く研究の方向として、これからは人間がどのように学び、記憶し、考え、コミュニケーションをとるかといった心の理解とそれらの教育や安全・安心への活用に関する研究が重要になるであろうとの発言があった。

また、新しい技術として提唱され

ているNBICについての現状やその応用についての紹介とNBICが社会、倫理に及ぼすと考えられる影響などについて議論が行われた。

NBICとはNanotechnology(ナノテクノロジー)、Biotechnology(バイオテクノロジー)、Information Technology(インフォメーションテクノロジー)、Cognitive Science(認知科学)を統合した概念である。一例として、人間とセンサのインタフェース技術やニューロンと電極を繋いだバイオチップの開発などが挙げられていた。

NBICは上記4つの科学技術領域を統合することで、「人」の物理的、精神的、社会的能力を改善する可能性を持つとされている。本領域の発展には、倫理問題や安全保障との関連が無視できず、NBICが社会に受け入れられる上で、倫理学者などを含めた倫理的なコンセンサスを得るための対話、4つのテクノロジーの創造性と独自性を保った上での技術移転、分野融合の手助けが必要との認識が示された。

6. まとめ

イラク戦争の終結から 1 年が経った中で開催された今年の年次フォーラムであるが、非防衛 R&D 予算確保の難しさ、ビザ問題、生物系研究所の管理問題など、2001 年のテロ以降、安全保障の問題が米国の科学に大きな影を落としている様子が垣間見えるものであった。特に、米国の財政問題およびテロ対策優先の風潮から、2006 年度以降非防衛 R&D 予算が減少していくとの見通しに、米国の学界が強い危機感を感じている。

経済競争の強力な相手国としては、中国が強く意識され注目を集めていた。国の総研究開発費や論文出版数の絶対量では米国、日本がまだ優位性を保っているが、他方で中国の存在感が急激に増しつつある。対照的に日本の存在感は小さくなりつつある。

また、次の研究開発の大きな課題として「心に関する研究」あるいは「認知科学」が浮上しつつあるように感じられた。認知科学に

ついては、現状では米国で国家規模のプロジェクトは実施されていないが、ナノテクノロジー、インフォメーションテクノロジー、バイオテクノロジーなどに関連した形で、今後国家規模のプロジェクトが実施される可能性もあり、今後の進展を見守る必要がある。

最後に年次フォーラムに参加した筆者の感想を書きたい。年次フォーラムでは議会での予算審議が本格化していくタイミングで、関係各界の一線で活躍中の科学技術政策関係者が一同に会して、争点となっている科学技術政策上の様々な問題について活発な質疑が行われる。これは、日本ではなかなか経験できないことであり、年次フォーラムへの参加は、米国における科学技術政策の課題事項を知る上で非常に有益であった。科学技術政策に関する開かれた討論の場の提供、海外に対して我が国の科学技術政策についての情報発信を行うためにも、日本でもこの

ような会議を開催する意義は大きいと感じた。

謝 辞

筆者らの年次フォーラムへの参加に当たっては、在アメリカ合衆国日本大使館の生川浩史参事官他の方々のご支援を頂きました。また、会場では同フォーラムに参加されていた(株)科学技術振興機構の北澤宏一理事、同研究開発戦略センター渡辺英一郎氏と意見交換をさせて頂き、さらに帰国後も渡辺氏と情報交換をさせて頂きました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 29th Annual Forum on Science and Technology Policy のホームページ (年次フォーラムのプログラムや発表資料が掲載されている): <http://www.aaas.org/spp/rd/forum.htm>

.....

科学技術動向研究センターとは

平成 13 年 1 月より内閣府総合科学技術会議が設置され、従来以上に戦略性を重視する政策立案が検討されています。科学技術政策研究所では、戦略策定に不可欠な重要科学技術分野の動向に関する調査・分析機能を充実・強化するため 1 月より新たに「科学技術動向研究センター」を設立いたしました。本センターでは、第 2 期「科学技術基本計画」に示されたライフサイエンス、情報通信等の重点分野の最新動向に係る情報の収集や今後の方向性についての調査・研究に、下図に示すような体制で取り組んでいます。

センターがとりまとめた成果は、適宜、総合科学技術会議、文部科学省へ政策立案に資する資料として提供いたします。

センターの具体的な活動は以下の 3 つです。

1

「科学技術専門家ネットワーク」による科学技術動向分析

わが国の産学官の研究者を「専門調査員」に委嘱して（2002 年度実績約 2800 人）、インターネットを利用して科学技術動向に関する幅広い情報を収集・分析する体制「科学技術専門家ネットワーク」を運営しています。このネットワークを通じ、専門調査員より国内外の学会合、学術雑誌などで発表される研究成果、注目すべき動向や今後の科学技術の方向性等に関する意見等を広く収集いたします。

これらの情報に、センターが独自に行う調査・研究の結果を加え、

毎月 1 回、「科学技術動向」としてまとめ、総合科学技術会議、文部科学省を始めとした科学技術関係機関等に配布いたします。なお、この資料は <http://www.nistep.go.jp> において公開します。

2

重要科学技術分野・領域の動向の調査研究

今後、国として取り組むべき重点事項、具体的な研究開発課題等を明確にすることを目的とし、重要な科学技術分野・領域に関するキーテクノロジー等を調査・分析します。

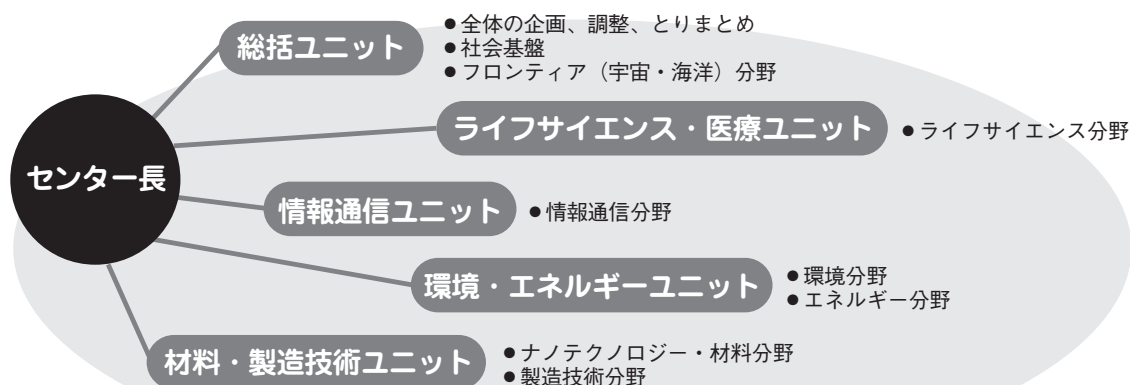
さらに、重要な科学技術分野・

領域ごとの科学技術水準を欧米先進国と比較し、わが国の科学技術がどのような位置にあるのかについての調査・分析も行います。

3

技術予測に関する調査研究

当研究所では、科学技術の長期的将来動向を総合的に把握するため、デルファイ法による技術予測調査をほぼ 5 年ごとに実施しています。これは、今後 30 年間の重要技術を抽出して、重要技術の重要性評価や実現予測時期を分析するものであり、センターは、多くの専門家の協力により本調査を引き続き実施いたします。



*それぞれのユニットには、職員その他、客員研究官（非常勤職員）を配置。

*センターの組織、担当分野などは適宜見直しを行う。

SCIENCE & TECHNOLOGY TRENDS

May 2004
(NO.38)

Science & Technology Foresight Center

National Institute of Science and
Technology Policy (NISTEP)
Ministry of Education, Culture, Sports,
Science and Technology

※このレポートについてのご意見、お問い合わせは、下記のメールアドレスまたは電話番号までお願いいたします

なお、科学技術動向のバックナンバーは、下記の URL にアクセスいただき「報告書一覧 科学技術動向・月報」でご覧いただけます。

文部科学省科学技術政策研究所 科学技術動向研究センター

連絡先：〒 100 - 0005 東京都千代田区丸の内 2 - 5 - 1

電話 03 - 3581 - 0605 FAX 03 - 3503 - 3996

URL <http://www.nistep.go.jp>

Email stfc@nistep.go.jp

- ▶ Life Sciences
- ▶ Information & Communication Technologies
- ▶ Environmental Sciences
- ▶ Nanotechnology & Materials
- ▶ Energy
- ▶ Manufacturing Technology
- ▶ Infrastructure
- ▶ Frontier